



Problème de tournées de véhicules avec contraintes de synchronisation dans le cadre de structures de maintien à domicile. Formalisation mathématique et hybridation à base de métaheuristique

Fabrice Gayraud

► To cite this version:

Fabrice Gayraud. Problème de tournées de véhicules avec contraintes de synchronisation dans le cadre de structures de maintien à domicile. Formalisation mathématique et hybridation à base de métaheuristique. Autre [cs.OH]. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2015. Français. NNT : 2015CLF22591 . tel-01289845

HAL Id: tel-01289845

<https://theses.hal.science/tel-01289845>

Submitted on 17 Mar 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'Ordre : 2591
EDSPIC : 705

UNIVERSITE BLAISE PASCAL - CLERMONT-FERRAND II
ECOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

THESE

présentée par

Fabrice GAYRAUD

pour obtenir le grade de

Docteur d'université

Spécialité : INFORMATIQUE

**Problème de tournées de véhicules avec
contraintes de synchronisation dans le cadre de
structures de maintien à domicile**

-

**Formalisation mathématique et hybridation à
base de métaheuristique**

Soutenue publiquement le 13 juillet 2015 devant le jury :

Rapporteurs	Christelle Jussien Guéret	Professeur des universités	Université d'Angers
	Thibaud Monteiro	Professeur des universités	INSA Lyon
Examineur	Yannick Kergosien	Maitre de conférences	Polytech Tours
Directeurs	Laurent Deroussi	Maitre de conférences	Université Clermont-Ferrand
	Nathalie Grangeon	Maitre de conférences	Université Clermont-Ferrand
	Sylvie Norre	Professeur des universités	Université Clermont-Ferrand

RESUME

Problème de tournées de véhicules avec contraintes de synchronisation dans le cadre de structures de maintien à domicile - Formalisation mathématique et hybridation à base de métaheuristique

Nous nous sommes intéressés à la problématique d'organisation des tournées de soins à domicile dans le cadre de structures de maintien à domicile comme par exemple les service d'Hospitalisation À Domicile ou les Services de Soins Infirmiers À Domicile. Les soins sont prodigués au domicile des patients par un ou deux soignants d'un type défini, comme médecin ou infirmier par exemple pendant une période de disponibilité du patient. Le patient est caractérisé par un niveau de dépendance et peut exprimer une préférence pour être soigné par un soignant plutôt qu'un autre. L'objectif est de construire les tournées des soignants en rendant visite à tous les patients tout en minimisant la longueur (ou durée) des tournées, en équilibrant les tournées suivant le niveau de dépendance des patients et en favorisant la préférence des patients. Après avoir réalisé un état de l'art des problèmes d'organisation de tournées de soins à domicile, nous proposons deux modélisations mathématiques de notre problème sous la forme d'un multiple Traveling Salesman Problem avec fenêtres de temps (m-TSPTW) auquel s'ajoute des contraintes spécifiques comme la synchronisation d'activités ou la prise en compte de types de ressource et des critères de performance propres au problème (équilibre et préférence).

Nous avons ensuite proposé des méthodes approchées basées sur des couplages métaheuristique - modèle de simulation testées sur des instances de la littérature d'un problème proche du nôtre et des instances adaptées à notre problème. Pour terminer, nous abordons trois perspectives de recherche :

- la réorganisation des tournées suite à l'absence d'un soignant,
- la prise en compte de temps de transport stochastique,
- la localisation de structures de maintien à domicile et l'impact sur la construction des tournées.

Mots-Clef : modélisation mathématique, couplage, métaheuristique, tournées de véhicules, synchronisation, soins à domicile

ABSTRACT

Vehicle routing problem with synchronization constraints in home care support services - Mathematical formulation and hybridization based on metaheuristics

We are interested in a routing problem within the context of home health care. The cares are provided by one or two caregivers with the required type at the patient's home during the patients' availability. A type is doctor or nurse for instance. Each patient is characterized by a dependency level and may give a preference for a caregiver. The goal is to construct the tour for each caregiver visiting all patients, minimizing the length of the tours, balancing the workload of the caregivers and maximizing the satisfaction of the patients. We present a state of the art of the home health care problem. Then we propose two mathematical models of our problem based on the multiple Traveling Salesman Problem with Time Windows (m-TSPTW) with specific constraints like the activities's synchronization or resources' type. The performance criteria are specific of our problem : workload balancing and patients' satisfaction.

We then propose approached methods based on combination between Metaheuristics and simulation model. This methods have been tested on dataset from the literature and dataset adapted to our problem. We conclude with three research perspectives :

- the reorganization of the tours when a caregiver is not available,
- the integration of stochastic transport time,
- the location of home support structure and its impact on the routes' construction.

Keywords : mathematical model, combination, Metaheuristics, routing problem, synchronization, home health care.

Mets ta heuristique, tu vas attraper froid !

IUT d'Allier et al., 20XX

Remerciements

La diversité des applications rencontrées lors de l'année de licence à l'IUT d'Allier (composition de la main de départ d'un jeu de pokémon, construction de tournée de véhicule avec possibilité de téléportation moyennant le paiement de quelques brouzoufs, . . .) m'a permis de découvrir l'optimisation et d'en apprécier la saveur. Ces enseignements étaient réalisés, entre autre, par Sylvie Norre, Nathalie Grangeon, Laurent Deroussi, David Lemoine et Patrice Leclaire.

J'ai eu la chance de retrouver Sylvie, Nathalie et Laurent quelques années plus tard pour réaliser ces travaux de thèse. Je tiens donc à les remercier vivement de m'avoir donné la chance de retravailler sur des sujets passionnants et de m'encadrer durant un peu plus de trois ans. Leur expertise, leur disponibilité, leurs encouragements et leur rigueur, quasi légendaire, ont été précieux pour arriver au terme de cette aventure. J'associe à mes remerciements les Clermontois de l'équipe. Nos visites du jeudi ont été le lieu de nombreux échanges.

Je remercie également Christelle Guéret-Jussien et Thibaud Monteiro pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et d'avoir accepté de le rapporter. Une mention spéciale à Thibaud Monteiro pour avoir présidé le jury lors de la soutenance et pour avoir participé au comité de thèse organisé au cours de ces trois ans. Enfin, je remercie Yannick Kergosien d'avoir complété ce jury en qualité d'examineur. Nos échanges, tant lors de la soutenance que lors de diverses conférences qui ont jalonné ces trois années, m'ont permis d'améliorer mes travaux.

Je remercie également David, informaticien parmi les physiciens, pour tous les moments passés, pour son aide et son expertise en modélisation. J'associe également le département GLT de l'IUT d'Aller :

- mes coloc' de la première heure : Anne-Cé, Christine et Valérie. Que de bons moments autour d'un ordinateur ou d'un dictionnaire Anglais-Français-Espagnol
- mes coloc' de la deuxième heure Fazia (qui m'a gentiment laissé sa place), Benjamin et Yves Jean
- Christine, Emilie, Sophie pour ses repas partagés le midi dans notre cantine collective

Mes remerciements ne seraient pas complets si je n'associais pas Mme Duval, chef de service de l'hospitalisation à domicile de l'hôpital de Montluçon, Mme Taillardat, cadre de santé de ce même service, ainsi que toutes les infirmières pour leur disponibilité et leur gentillesse lors des réunions qui m'ont permis de comprendre et d'appréhender le problème que nous avons traité.

Mes pensées vont également vers mes parents qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de mes longues et sinueuses années d'études. Je termine par Virginie qui, tel un matador, a su me piquer pour avancer grâce à sa patience, ses encouragements et nos échanges parfois animés mais toujours passionnés.

Table des matières

Introduction	15
1 Contexte et problématique	19
Introduction	20
I Contexte général et scientifique	20
1 Le maintien à domicile	20
2 Contexte scientifique	27
3 Présentation des structures locales	29
II Problématique	33
1 Problématiques rencontrées dans le maintien à domicile	34
2 Notre problématique	35
Conclusion	36
2 L'organisation des tournées de soins à domicile dans la littérature	39
Introduction	41
I Proposition d'une classification et d'une notation pour les problèmes d'organisation de tournées de soins à domicile	42
1 Classification	42
2 Notation	44
II Revue de la littérature	47
1 Présentation des modèles mono-type	48
2 Présentation des modèles multi-type	65
3 Synthèse des méthodes de résolution	67
4 Positionnement de notre problème dans la littérature	68
Conclusion	68
3 Modélisation de l'organisation des tournées de soins à domicile	71
Introduction	72
I Problème réel	73
1 Présentation des données de base	73
2 Intégration du problème d'organisation des tournées	74
II Analyse des besoins	75

1	Organisation/réorganisation	75
2	Simulation	75
3	Consultation	76
III	Problème traité	76
1	Analyse	76
2	Modélisations mathématiques	79
	Conclusion	82
4	Méthodes d'optimisation	83
	Introduction	85
I	Présentation des méthodes	85
1	Les métaheuristiques	85
2	Méthodes hybrides à base de métaheuristiques	89
II	Proposition de méthodes pour la construction de tournées de soins, codage indirect . .	91
1	Codage d'une solution	91
2	Systèmes de voisinage	91
3	Fonction objectif	92
4	Modèle d'affectation et d'évaluation	92
5	Couplage	94
III	Proposition de méthodes pour la construction de tournées de soins, codage direct . . .	98
1	Codage d'une solution	98
2	Systèmes de voisinage	99
3	Admissibilité des solutions construites	100
4	Fonction objectif	101
5	Modèle d'évaluation	101
6	Couplage	102
IV	Mise en œuvre et résultats	107
1	Comparaison avec des résultats de la littérature	107
2	Résultats obtenus pour notre problème	116
	Conclusion	126
5	Pistes de recherche : réorganisation de tournées, incertitude et localisation de sites	129
	Introduction	130
I	Réorganisation des tournées de soins	130
1	Description du problème	130
2	Proposition de résolution à l'aide d'une métaheuristique	131
3	Premiers résultats	134
II	Prise en compte de temps de transport stochastiques	136
1	Définition de la robustesse	136

2	Évaluation de la robustesse de la solution obtenue avec une résolution déterministe	137
3	Optimisation suivant la robustesse des solutions	138
III	Localisation de sites	141
1	Modèles de base	141
2	Modèle mono-échelon multi-période	142
3	Ébauche de démarche de résolution	144
	Conclusion	145

Conclusion 147

Annexes 155

	Annexe 1 - Résultats - instances de Bredström et Rönnqvist (2008)	158
	Annexe 2 - Résultats sur nos petites instances	174
	Annexe 3 - Notation and classification for logistic network design	199

Liste des tableaux

1	Emplois induits par la dépendance selon le type d'accompagnement en Auvergne . . .	16
1.1	Récapitulatif des ressources disponibles pour les livraisons du GCS	31
1.2	Flux GCS	32
1.3	Couplage horizon temporel et approche de modélisation	34
2.1	Champ α - structure	45
2.2	Champ β - règles de gestion	46
2.3	Champ γ - critères de performance	47
2.8	Méthodes de résolution	67
3.1	Degré de compatibilité - type de ressource	78
3.2	Degré de compatibilité - type de ressource et préférence des patients	78
3.3	Valeurs des coefficients (α_i) $i \in \{1, 2, 3\}$	81
4.1	Résumé des données de l'exemple - organisation des tournées de soins	98
4.2	Comparaison entre le problème de Bredström et Rönnqvist (2008) et notre problème .	107
4.3	Tailles des instances de Bredström et Rönnqvist (2008)	108
4.4	Coefficients de la fonction objectif - Instances de Bredström et Rönnqvist (2008) . . .	109
4.5	Adapation des coefficients de la fonction objectif	110
4.6	Tableau de lecture des résultats en annexe - instances de Bredström et Rönnqvist (2008)	110
4.7	Instance 1 de Bredström et Rönnqvist (2008) - Durée des tournées - recuit simulé . .	111
4.8	Paramètres de la Recherche Locale Itérée	112
4.9	Comparaison entre critères d'acceptation suivant l'amplitude des fenêtres de temps - petites instances	112
4.10	Comparaison entre critères d'acceptation suivant les critères de performance - petites instances	112
4.11	Comparaison entre méthodes suivant l'amplitude des fenêtres de temps - petites ins- tances	113
4.12	Comparaison entre méthodes suivant le critère - petites instances	113
4.13	Comparaison - instance L - critère durée + équilibrage	113
4.14	Comparaison avec la méthode proposée par Afifi et al. (2013)	114
4.15	Nouvelles bornes supérieures - durée des tournées - instances de petite taille	115

4.16	Nouvelles bornes supérieures - préférence des patients - instances de petite taille . . .	115
4.17	Nouvelles bornes supérieures - équilibrage des tournées - instances de petite taille . .	115
4.18	Nouvelles bornes supérieures - durée + équilibrage des tournées - instances de petite taille	116
4.19	Instances 6 à 10 - durée et équilibrage des tournées - recherche locale itérée <i>BW</i> et <i>MW</i>	117
4.20	Nouvelles bornes supérieures - durée + équilibrage des tournées - petites, moyennes et grandes instances	118
4.21	Nombre d'instances	119
4.22	Comparaison des modèles mathématiques - 1 type de ressource 10% d'activités synchronisées - Critère Distance / Compatibilité	120
4.23	Comparaison des modèles mathématiques - 1 type de ressource 10% d'activités synchronisées - Critère Compatibilité / Distance	121
4.24	Comparaison des modèles mathématiques - 2 type de ressource 20% d'activités synchronisées - Critère Distance / Compatibilité	122
4.25	Comparaison des modèles mathématiques - 2 types de ressource 20% d'activités synchronisées - Critère Compatibilité / Distance	123
4.26	Tableau de lecture des résultats en annexe 2 - petites instances	124
4.27	Synthèse des résultats sur nos instances	125
4.28	Résultats obtenus sur les instances de taille moyenne et grande	126
5.1	Comparaison approche organisation / réorganisation	136
5.2	Robustesse des solutions	140
6.1	Tableau des tableaux de résultats - instances de Bredström et Rönnqvist (2008) . . .	158
6.2	Instances 1 à 5 - durée des tournées - recuit simulé	159
6.3	Instances 1 à 5 - préférence des patients - recuit simulé	160
6.4	Instances 1 à 5 - équilibrage des tournées - recuit simulé	161
6.5	Instances 1 à 5 - durée des tournées - recherche locale itérée <i>RW</i>	162
6.6	Instances 1 à 5 - durée des tournées - recherche locale itérée <i>BW</i>	163
6.7	Instances 1 à 5 - durée des tournées - recherche locale itérée <i>MW</i>	164
6.8	Instances 1 à 5 - préférence des patients - recherche locale itérée <i>RW</i>	165
6.9	Instances 1 à 5 - préférence des patients - recherche locale itérée <i>BW</i>	166
6.10	Instances 1 à 5 - préférence des patients - recherche locale itérée <i>MW</i>	167
6.11	Instances 1 à 5 - équilibrage des tournées - recherche locale itérée <i>RW</i>	168
6.12	Instances 1 à 5 - équilibrage des tournées - recherche locale itérée <i>BW</i>	169
6.13	Instances 1 à 5 - équilibrage des tournées - recherche locale itérée <i>MW</i>	170
6.14	Instance <i>1L</i> à <i>5L</i> - durée et équilibrage des tournées - recherche locale itérée <i>BW</i> , <i>MW</i>	171
6.15	Instances 6 à 10 - durée et équilibrage des tournées - recherche locale itérée <i>BW</i> . . .	172
6.16	Instances 6 à 10 - durée et équilibrage des tournées - recherche locale itérée <i>MW</i> . . .	173
6.17	Tableau des tableaux de résultats - petites instances	174
6.18	Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	175
6.19	Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	175

6.20	Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	176
6.21	Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	176
6.22	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	177
6.23	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	177
6.24	Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	178
6.25	Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	178
6.26	Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	179
6.27	Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	179
6.28	Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	180
6.29	Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	180
6.30	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	181
6.31	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	181
6.32	Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	182
6.33	Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	182
6.34	Résultats - 1 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	183
6.35	Résultats - 1 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	183
6.36	Résultats - 1 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	184
6.37	Résultats - 1 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	184
6.38	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	185
6.39	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	185
6.40	Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	186
6.41	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	186
6.42	Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	187
6.43	Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	187
6.44	Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	188
6.45	Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	188
6.46	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	189
6.47	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	189
6.48	Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	190
6.49	Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	190
6.50	Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	191
6.51	Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	191
6.52	Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	192
6.53	Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	192
6.54	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	193
6.55	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	193
6.56	Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	194
6.57	Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	194
6.58	Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	195

6.59	Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	195
6.60	Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	196
6.61	Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	196
6.62	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	197
6.63	Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	197
6.64	Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>BW</i>	198
6.65	Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - <i>MW</i>	198

Table des figures

1.1	Espérance de vie à la naissance en France, source : INSEE	22
1.2	Evolution du taux de fécondité en France de 1945 à nos jours, source : INSEE	23
1.3	Répartition des personnes prises en charge suivant la grille AGGIR	27
1.4	Résumé des catégories de contraintes - soins à domicile, traduit de (Bertels et Fahle 2006)	28
1.5	Périmètre de prise en charge de la HAD63	29
1.6	Périmètre de prise en charge de AURA Auvergne	30
1.7	Exemple de construction de tournées, 13 patients et 3 soignants	36
1.8	Diagramme de Gantt - Disponibilité des patients et tournées des soignants	37
2.1	Classification - problèmes d'organisation de soins à domicile	42
3.1	Démarche de modélisation - Gourgand et Kellert (1991)	72
3.2	Modélisation des données de base	73
3.3	Modélisation des données de base intégrant l'organisation des soins à domicile	74
3.4	Diagramme des cas d'utilisation	76
3.5	Modèle de connaissance du problème traité	77
4.1	Classification des métaheuristiques hybrides, extrait et traduit de Talbi (2002)	90
4.2	Double complexité - Norre (2005)	90
4.3	Principe du couplage - Norre (2005)	90
4.4	Voisinage insertion I_1	91
4.5	Voisinage échange E_1	92
4.6	Couplage métaheuristique - heuristique d'affectation et d'évaluation	95
4.7	Exemple - Codage et représentation d'une solution	99
4.8	Voisinage insertion I_2	100
4.9	Voisinage permutation P_2	101
4.10	Solution avec un circuit	101
4.11	Couplage métaheuristique - simulation	102
5.1	Résumé des données et solution de l'exemple - réorganisation des tournées de soins	131
5.2	Exemple - Codage d'une solution - réorganisation de tournées	132
5.3	Évolution de la moyenne de la somme des retards suivant le nombre de réplifications	137
5.4	Minima locaux, instance 7S	140
5.5	Approche de résolution	145

Introduction

L'amélioration des conditions de vie et des techniques médicales a entraîné une augmentation de l'espérance de vie de 30% en l'espace de cinquante ans. La dépendance d'une personne est définie par un état durable de la personne entraînant des incapacités et requérant des aides pour réaliser des actes de la vie quotidienne. En 2012, la France métropolitaine comptait 1,17 millions de personnes dépendantes au sens de l'allocation personnalisée d'autonomie, soit 7,8% des 60 ans et plus. En 2060, selon un scénario intermédiaire de projection, le nombre de personnes âgées dépendantes atteindrait 2,3 millions. Ces informations sont issues du site internet de l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) ¹.

Le développement des structures de maintien à domicile, que nous présentons dans le chapitre 1, est favorisé par le contexte social et les perspectives d'évolution de notre société. Ces structures contribuent à assurer des soins favorisant une prise en charge alternative à l'hébergement en établissement. D'ailleurs, les soins à domicile représentent une valeur de 1,5 milliard d'euros, soit trois fois plus qu'en 1998.

Des choix politiques sont également moteur de ce développement. La mise en place de l'Allocation Personnalisée d'Autonomie en 2002, destinée aux personnes de plus de 60 ans en perte d'autonomie, permet de couvrir en partie les dépenses de toute nature pour accomplir des actes essentiels de la vie ou suivre une personne dont l'état nécessite une surveillance régulière. Comme nous l'avons vu au début de cette introduction, le nombre de personnes recevant cette allocation pourrait doubler à l'horizon 2060.

Enfin les facteurs économiques poussent au développement de ces structures. Dans une étude intitulée « Soins de réhabilitation et d'accompagnement : une analyse comparative des coûts d'hospitalisation à domicile et en établissement », l'Institut de Recherche et Documentation en Économie de la Santé (IRDES) fait ressortir que le coût d'une journée est 40% inférieur dans une structure de maintien à domicile (service d'Hospitalisation À Domicile dans ce cas) qu'en établissement pour des soins comparables. Cette différence s'atténue pour les patients âgés ou fortement dépendants mais le coût moyen dans une structure de maintien à domicile demeure inférieur quel que soit l'âge, le niveau de dépendance et le profil médical du patient.

Une étude de l'INSEE sur la démographie de la région Auvergne comparée aux autres régions européennes montre que la population auvergnate est l'une des plus vieilles d'Europe. La part des plus de 65 ans est de 20,1% (3% au dessus de la moyenne européenne) ce qui la place au cinquantième rang en Europe (sur 260 régions). L'adéquation entre l'offre de soins et le vieillissement plus prononcé de la population et le risque accru de dépendance constituent un enjeu central. Toujours dans ce rapport, l'INSEE indique que l'Auvergne se place au treizième rang européen avec 885 lits pour 100 000 habitants. Cependant cette situation masque les disparités territoriales ; les temps d'accès aux hôpitaux sont élevés depuis certains territoires ruraux ou montagneux.

L'INSEE a réalisé une enquête publiée en 2012 sur l'évolution des personnes dépendantes à l'horizon 2030 en Auvergne. Trois phases ressortent :

1. www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=T14F096, consultation le 22 avril 2015

Catégorie de personnel	Effectif en 2020 (ETP)	Évolution 2010-2020
Emplois en institution	15040	+3490
infirmier	1390	+320
aide soignant	4490	+1040
autre personnel médical et paramédical	630	+150
personnel éducatif, pédagogique, social et d'animation	1000	+230
agent de service hospitalier ou agent de service	4340	+1010
personnel de services généraux et personnel d'encadrement	3190	+740
Emplois à domicile	12720	+3550
infirmier	2920	+800
aide soignant	930	+260
autre professionnel paramédical	550	+150
aide ménagère, aide à domicile, garde à domicile	7550	+2140
autres	780	+200
Ensemble des emplois en institution et à domicile	27760	+7040

Tableau 1 – Emplois induits par la dépendance selon le type d'accompagnement en Auvergne
Source : INSEE, Enquête Handicap-Santé (2008-2009), projections d'emploi ; Drees, EHPA 2007, SSIAD 2008

- d'ici 2020, le nombre de dépendants devrait s'accroître rapidement avec l'entrée en dépendance des générations nées à la fin de la première guerre mondiale,
- de 2020 à 2025, cette période serait caractérisée par un ralentissement avec l'arrivée aux grands âges des générations nées entre 1935 et 1945. Cet intervalle est marqué par une faible natalité due au contexte économique (suite à la crise économique de 1929) et politique (seconde guerre mondiale) défavorable.
- à partir de 2025, les premières générations du baby-boom atteindront progressivement leur quatre-vingtième anniversaire et donc un accroissement des personnes âgées dépendantes est à prévoir.

Les politiques de prévention de la dépendance et les progrès de la médecine permettent de retarder l'âge de perte d'autonomie. En 2030, elle interviendrait à 83,4 ans au lieu de 81,8 ans en moyenne actuellement. Une conséquence de cette évolution impacte directement l'augmentation du nombre de personnes travaillant auprès des personnes âgées dépendantes. En Auvergne, sous réserve de modification de politique publique, l'INSEE indique que le besoin est estimé à 7000 équivalents temps plein nécessaires d'ici 2020 soit une hausse de 34%. Le tableau 1 détaille ces chiffres suivant les métiers et le type de prise en charge (en institution ou à domicile). Il permet également de voir que la moitié de ces emplois est générée par la prise en charge à domicile.

A l'heure actuelle, la solution du maintien à domicile reste financièrement plus intéressante que l'hospitalisation en établissement. L'augmentation estimée de la demande ainsi que des ressources nécessaires exige un travail sur l'organisation pour conserver les avantages économiques de cette formule.

L'essor de ces structures fait apparaître des problématiques organisationnelles à tous les niveaux de décision. Au niveau stratégique, il faut déterminer la localisation des structures pour prodiguer les soins et proposer une bonne couverture du territoire suivant les lieux d'habitation des patients, les coûts engendrés par l'ouverture et l'exploitation de ces structures, ... Au niveau tactique, il faut dimensionner les besoins en ressources (humaines et matérielles) dans chacune des structures pour proposer un service de qualité tout en respectant des contraintes légales (temps de travail), des contraintes liées aux soins à dispenser, maîtriser les coûts, ... Enfin, au niveau opérationnel, il faut organiser les visites au domicile

des patients en limitant les temps improductif des ressources comme les temps de transport ou d'attente par exemple. Dans ce mémoire, nous abordons une problématique opérationnelle et souhaitons proposer un outil d'aide à la décision pour organiser les visites des personnels soignants. Il s'articule autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre décrit le contexte de nos travaux ainsi que la problématique. La première partie aborde le contexte général et scientifique en définissant ce qu'est le maintien à domicile en commençant par des définitions historiques et contemporaines, les facteurs de développement démographiques, politiques et économiques puis nous abordons des structures médicales, sociales et médico-sociales existantes en France. Ensuite un éclairage scientifique est apporté sur les contraintes rencontrées par des infirmiers de services d'hospitalisation à domicile avec les travaux de Bertels et Fahle (2006). Cette partie se termine avec une présentation des structures locales que nous avons rencontrées. La seconde partie de ce chapitre présente la problématique de nos travaux.

Le deuxième chapitre est consacré à l'organisation des tournées de soins à domicile dans la littérature. Il est également séparé en deux parties. La première est une proposition de classification et de notation qui nous a permis de structurer notre travail. Les classes sont réalisées suivant le nombre de types de ressources considéré dans les modèles de la littérature et la prise en compte ou non d'activités synchronisées. La notation est réalisée suivant trois champs. Le premier champ décrit la structure du modèle étudié, le second les règles de gestion qui lient les patients et les soignants et le troisième les critères de performance. La deuxième partie de ce chapitre est l'état de l'art à proprement parlé. Il suit la structure donnée par la classification. Il se termine par une synthèse des méthodes de résolution.

Le troisième chapitre débute par la présentation de la méthodologie que nous avons suivie. Ce chapitre décrit la première étape de cette méthodologie en construisant un modèle de connaissance du problème traité. Pour cela, nous débutons par une phase d'analyse et de spécification de la problématique pour arriver au problème traité. Le fruit des phases d'analyse et de spécification de la problématique est présenté sous la forme de diagrammes de classes UML (modélisation des données de base puis modélisation des données de base avec prise en compte de la construction de tournées de soins) ainsi qu'un modèle des cas d'utilisation qui décrit les fonctionnalités d'un outil d'aide à la décision que nous devons développer. Ce chapitre se termine par la modélisation du problème traité sous forme d'une diagramme de classes UML (phase d'analyse) et de deux modèles mathématiques (spécification)

Le quatrième chapitre aborde la construction du modèle d'action. Il débute par une présentation des méthodes approchées de type métaheuristique que nous avons utilisées. Ensuite nous décrivons les deux couplages réalisés en précisant pour chacun le codage d'une solution, les systèmes de voisinages ainsi que le modèle de simulation que nous avons développé. Ce chapitre se termine par les résultats obtenus, tout d'abord sur des instances de la littérature, construites pour un problème proche du nôtre, pour lesquelles nous avons dû adapter nos méthodes de résolution. Dans un second temps, nous avons adapté les instances précédentes pour avoir des instances qui correspondent à notre problématique.

Enfin, le dernier chapitre propose trois perspectives, plus ou moins avancées, de nos travaux dans le cadre de structures de maintien à domicile. La première partie propose une approche de résolution pour la réorganisation des tournées en cas d'indisponibilité d'une ressource. Cette fonctionnalité apparaît dans l'analyse des besoins du chapitre 3. Nous nous sommes ensuite intéressés à l'impact de temps de transport stochastiques sur les solutions construites en contexte déterministe dans le chapitre précédent. Pour cela, nous évaluons les retards par rapport à la date de début au plus tard et nous les comparons aux retards obtenus pour des solutions construites avec une approche intégrant la robustesse comme critère de performance. Pour terminer, la troisième partie traite d'un problème de localisation de services de soins infirmiers à domicile pour favoriser l'accès aux soins et le maintien à domicile.

Chapitre 1

Contexte et problématique

Sommaire

Introduction	20
I Contexte général et scientifique	20
1 Le maintien à domicile	20
1.1 Définitions	21
1.1.1 Historiques	21
1.1.2 Contemporaines	21
1.2 Facteurs de développement	22
1.2.1 Facteurs démographiques	22
1.2.2 Facteurs politiques et économiques	23
1.3 Les structures de maintien à domicile	25
1.3.1 Structures médicales	25
1.3.2 Structures sociales et médico-sociales	26
2 Contexte scientifique	27
3 Présentation des structures locales	29
3.1 Groupement de Coopération Sanitaire de Cébazat (GCS)	29
3.1.1 Compostion du GCS	29
3.1.2 Pharmacie à Usage Interne (PUI) du GCS	30
3.2 Structure de maintien à domicile à Montluçon	32
3.2.1 Service d'Hospitalisation À Domicile (HAD)	32
3.2.2 Service de Soins Infirmiers À Domicile de Montluçon (SSIAD)	32
II Problématique	33
1 Problématiques rencontrées dans le maintien à domicile	34
2 Notre problématique	35
Conclusion	36

Introduction

Le rapport Laroque (1962) préconise que l'accent soit mis en priorité sur la nécessité d'intégrer les personnes âgées dans la société tout en leur fournissant le moyen de continuer le plus longtemps possible à mener une vie indépendante.

Fort de cette préconisation, la communauté médicale a mis en place une voie alternative à l'hospitalisation classique en hôpital. En effet, le suivi de certains patients ne nécessite pas une présence continue du personnel soignant ou de matériels spécifiques. Dans ce cas, le suivi peut être réalisé au domicile du patient qui pourra ainsi conserver ses habitudes de vie et rester auprès de sa famille. Ainsi, depuis un demi-siècle, cette voie est préconisée et même plébiscitée par le corps médical, les patients et leur entourage ainsi que les instances politiques. Une étude publiée par la fédération hospitalière de France indique le gain économique de cette solution. De nombreux plans politiques ont été mis en place pour favoriser le développement de ces structures.

Ces structures, récemment ouvertes, se retrouvent confrontées à des problématiques propres aux structures hospitalières mais également à des problématiques liées aux interventions aux domiciles des patients. En effet, la dispensation des soins implique d'avoir la bonne ressource pour réaliser le bon geste médical au bon patient, au bon moment et avec le bon matériel qui n'est pas sans rappeler un des crédos de la logistique qui est de livrer le bon produit, au bon client, à la bonne heure et au bon prix. Le maintien à domicile implique également de prendre en compte le fait que le patient n'est plus dans une chambre d'hôpital mais loin de la structure où se trouvent les soignants. Par conséquent, en plus de la problématique précédente, il faut envisager des durées de déplacement sans valeur ajoutée plus ou moins importantes entre chaque patient et la gestion des différents acteurs qui interviennent.

Afin de bien placer le contexte de ce mémoire, nous présentons le contexte historique de la création du maintien à domicile en indiquant les différents facteurs permettant leur évolution et leur développement jusqu'aux structures que nous connaissons aujourd'hui. Après la description de ces structures de manière générale, nous détaillons le fonctionnement de ces structures d'un point de vue local. La création et l'évolution de ces structures ont été l'objet de nombreuses études pour améliorer leur fonctionnement et notamment la prise en charge des patients ou encore la distribution des médicaments. Après avoir décrit les problématiques traitées dans la littérature, nous présentons plus en détail la problématique relative à notre étude. Notre problématique relève à la fois de l'amélioration des conditions de travail du personnel et des conditions de prise en charge des patients.

I Contexte général et scientifique

Dans cette partie, nous expliquons le contexte de nos travaux. Nous commençons par le contexte général et scientifique en développant les définitions historiques et contemporaines du maintien à domicile, puis nous insistons sur les facteurs de développement (démographiques, politiques et économiques) pour terminer par la description des structures en France. Nous présentons les travaux de Bertels et Fahle (2006) qui donnent un cadre scientifique à nos travaux. Cela nous amène ensuite au contexte local et la présentation des structures que nous avons rencontrées : le Groupement de Coopération Sanitaire de Cébazat, le service d'Hospitalisation À Domicile du centre hospitalier de Montluçon et le Service de Soins Infirmiers À Domicile de la ville de Montluçon.

1 Le maintien à domicile

Le maintien à domicile est une idée qui a fait son chemin dans la société et connu de nombreuses évolutions jusqu'aux structures que nous connaissons aujourd'hui. Après la révolution française, sont apparus les premiers textes précisant les conditions du retour à domicile de certains patients (en général des personnes âgées). Nous commençons donc par un rapide historique de l'apparition et de l'évolution

du maintien au domicile pour aboutir à une définition contemporaine. Le maintien à domicile connaît encore de nombreuses évolutions en fonction des facteurs démographiques, politiques et économiques que nous présentons. Nous terminons par un bilan des structures existantes en France en décrivant leur fonctionnement.

1.1 Définitions

1.1.1 Historiques

Les débats autour du maintien à domicile ne sont pas nouveaux. Dans ses travaux, Ennuyer (2007) montre l'évolution de la définition du maintien à domicile suivant les époques. Les prémices apparaissent en France dans un décret de 1791 :

Art. Premier : il y aura deux espèces de secours pour les vieillards et infirmes : le secours à domicile ; le secours dans les asyles publics.

Art. 2 : le secours à domicile sera le secours ordinaire. Le secours dans les asyles publics n'aura lieu que pour les individus qui ne pourront pas le recevoir, à raison de défaut de famille, d'infirmités graves qui exigeroient des soins particuliers, ou de toute autre cause pareille.

Dans la définition originelle, le maintien à domicile concerne les vieillards et les infirmes. Quelques décennies plus tard en 1851, les dimensions économique et de « bien-être » des patients apparaissent et indique qu'un maintien à domicile, dans des circonstances bien définies, est préférable comme nous le montre un rapport de la commission d'Assistance publique :

Lorsque avec un secours moindre qu'il recevrait à domicile, le vieillard ferait bénir sa présence au milieu de sa famille à qui il rendrait encore quelques services, il est enfermé loin du foyer domestique avec des hommes que leur âge, leurs infirmités rendent tristes et moroses comme lui (...) un secours distribué avec intelligence coûterait beaucoup moins cher que le séjour à l'hôpital et ne donnerait à l'ouvrier la perspective d'un asile assuré qui exclut toute idée d'économie.

Ennuyer (2007) évoque ensuite la loi du 14 juillet 1905 qui permet aux vieillards de finir leurs jours à domicile. Cependant, la tendance est de confier les vieillards à des institutions comme les hospices pour la fin de vie. Un changement va s'opérer dans les années 1950 avec l'apparition des petites sœurs de l'assomption par exemple.

Ces aides ménagères de l'époque vont rapidement devenir les pivots de la politique du maintien à domicile.

Cela va déboucher sur le rapport (Laroque 1962) qui préconise que l'accent soit mis *par priorité sur la nécessité d'intégrer les personnes âgées dans la société tout en leur fournissant le moyen de continuer le plus longtemps possible à mener une vie indépendante*. Les aides préconisées consistent à envoyer chez le bénéficiaire, selon un rythme et une durée déterminée, une aide-ménagère, pour pourvoir aux tâches matérielles auxquelles les intéressés ne peuvent faire face. De plus, ce rapport indique que l'aide sociale n'est plus octroyée sous condition d'un état de santé ou d'âge mais chaque fois qu'elle peut éviter un placement.

1.1.2 Contemporaines

Ennuyer (2007) propose la définition suivante ;

le maintien à domicile, c'est d'abord et avant tout, l'expression du désir de nombreuses personnes qui ont fait le choix de demeurer dans leur domicile jusqu'au bout de leur âge et de leur vie, c'est-à-dire qu'elles ont souhaité continuer à vivre et mourir chez elles.

Cette définition considère le maintien à domicile comme un choix de fin de vie pour les personnes âgées ou des personnes handicapées dépendantes.

Roy (1994) corrobore cela dans des travaux québécois et insistent sur le lien étroit entre le maintien à domicile et les politiques mises en œuvre pour les personnes âgées. Il précise même que 70% des personnes qui ont recours aux structures de maintien à domicile ont plus de 65 ans. Cependant en 1980, d'autres groupes de personnes sont visés : les personnes handicapées, les malades chroniques, les personnes post-hospitalisées et les familles en difficulté. Suivront ensuite, les personnes en phase terminale et les malades du SIDA. Cela aboutira en 1979, à une définition plus large donnée par l'état québécois qui souhaite proposer une alternative complète à l'hébergement institutionnel :

Par services à domicile, on entend l'ensemble des activités visant à apporter au domicile du bénéficiaire un soutien moral, matériel et médical susceptible de compenser une perte d'autonomie, de prévenir ou de pallier à une situation de crise et d'éviter ou d'abrégé le séjour en institution.

Dans les écrits des deux auteurs, nous constatons que le développement des structures de maintien à domicile est guidé par le vieillissement de la population. Cependant, ce n'est pas le seul facteur comme nous allons le voir à présent.

1.2 Facteurs de développement

1.2.1 Facteurs démographiques

La population des pays développés vieillit. Différents facteurs interviennent dans ce processus :

- l'augmentation de la durée de vie,
- une natalité importante pendant la période des trente glorieuses entre 1945 et 1973 ,
- une baisse de la natalité depuis les années 1970,

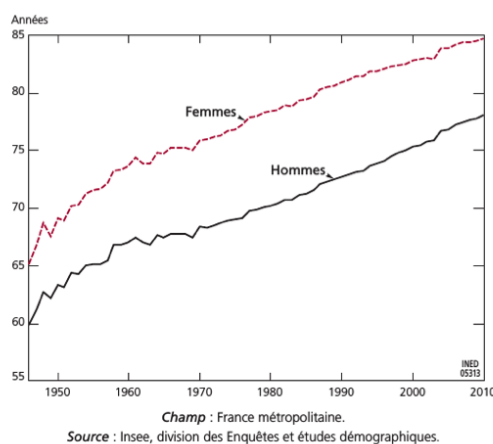


Figure 1.1 – Espérance de vie à la naissance en France, source : INSEE

En effet, comme nous le constatons sur la figure 1.1 extraite d'une enquête de l'INSEE, l'espérance de vie à la naissance a crû d'environ 30% entre 1945 et nos jours. L'espérance de vie à la naissance des femmes est maintenant de 80 ans (au lieu de 65 en 1945) et des hommes de 78 ans contre 60 en 1945. La figure 1.2 confirme l'évolution de la natalité depuis 1945, une fécondité élevée pendant les trente glorieuses de 1945 à 1973 avec un taux compris entre 2.7 et 3 enfants par femme puis une baisse brutale pour osciller entre 1.60 et 2 enfants par femme. Nous pouvons également ajouter une immigration importante au lendemain de la seconde guerre mondiale. Dans cette période de reconstruction et de prospérité économique, la France manque de main d'œuvre, elle attire donc les immigrants de pays d'Europe et d'Afrique du Nord. Ainsi, la population jeune à cette période, qui a plus de 65 ans aujourd'hui,

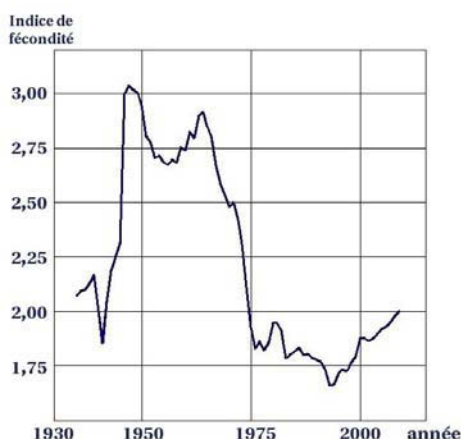


Figure 1.2 – Evolution du taux de fécondité en France de 1945 à nos jours, source : INSEE

augmente. La conjonction de ces différents phénomènes, augmentation de l'espérance de vie, variation du taux de fécondité et immigration importante, induit un vieillissement de la population.

Pour conclure cette partie, nous revenons sur le rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé (2012). Les auteurs définissent quatre domaines prioritaires stratégiques pour faire face au vieillissement rapide de la population européenne et par conséquent de la population française :

- *prendre de l'âge en restant en bonne santé, tout au long de sa vie,*
- *des systèmes de santé et de soins de longue durée adaptés à des populations vieillissantes,*
- *des environnements favorables,*
- *renforcer la recherche et étoffer les bases factuelles,*

et cinq interventions prioritaires parmi lesquelles le soutien des aidants informels par le secteur public et l'accent mis sur les soins à domicile. Concernant les soins à domicile, les auteurs du rapport remarquent que

dans certains pays de la région européenne, les soins de longue durée fournis dans les foyers sont considérés comme une alternative privilégiée, présentant un bon rapport coût-efficacité par rapport aux soins dispensés dans une maison de repos ou un autre établissement. Dans ces pays, les soins à domicile sont devenus un élément important des services financés par le secteur public.

Selon ce rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé (2012), le maintien à domicile permet d'économiser des coûts de fonctionnement des établissements de santé. Ceci nous amène tout naturellement vers les facteurs politiques et économiques qui favorisent l'émergence des structures de soins à domicile.

1.2.2 Facteurs politiques et économiques

Les facteurs politiques et économiques ciblent particulièrement deux types de structure de maintien à domicile, l'hospitalisation à domicile (HAD) et le service de soins infirmiers à domicile (SSIAD) présentés en détail dans la suite du chapitre.

Les réformes hospitalières ont accompagné l'histoire de France depuis le *IV^{ème}* et *V^{ème}* siècle, époque à laquelle sont créées les maisons d'hospitalité qui accueillent les malheureux, malades ou trop âgés ou les pèlerins sur le chemin de Compostelle. En 1544, pour coordonner l'activité des différents hôpitaux du royaume, François 1^{er} crée le grand bureau des Pauvres. Un recensement des hôpitaux est effectué par Necker en 1784 alors ministre de Louis XVI, et porte à 700 le nombre d'hôpitaux. La loi du 7 août 1851 consacre l'autonomie des hôpitaux par rapport à la commune de leur implantation et les dote de personnalité morale. Ils ont la possibilité d'avoir un patrimoine, dispose d'un budget. De plus,

la loi autorise à présent l'implantation d'établissements privés dans les communes qui ne disposent pas de structure de maintien à domicile.

Plus près de nous, la loi du 31 décembre 1970 reconnaît l'hospitalisation à domicile comme une forme d'hospitalisation. Enfin, nous allons nous intéresser au plan hôpital de 2007 en détaillant les parties qui nous intéressent. Il s'articule autour de deux mesures :

- l'allègement des contraintes extérieures aux établissements,
- la modernisation de la gestion interne des hôpitaux publics.

La première mesure met en place cinq axes de travail :

1. la modernisation des établissements par une relance de l'investissement ;
2. la tarification à l'activité (T2A) ;
3. la rénovation des modes d'achat des hôpitaux ;
4. une organisation simplifiée, déconcentrée et renouvelée ;
5. la coopération sanitaire.

Le point 4 aborde le cas des structures alternatives à l'hospitalisation qui doivent être développées pour deux raisons :

- permettre au patient de bénéficier d'une prise en charge adaptée et de qualité,
- aider au décloisonnement entre la médecine hospitalière et la médecine de ville, et entre le sanitaire et le social.

Pour favoriser le développement de ces structures, le plan hôpital 2007 prévoit qu'un lit ouvert dans une structure alternative n'entraîne pas la fermeture d'un lit dans un hôpital comme c'était le cas auparavant. Cette règle s'applique pour l'ensemble des alternatives à l'hospitalisation que sont :

- les structures pratiquant l'anesthésie ou la chirurgie ambulatoire,
- les structures d'hospitalisation à temps partiel,
- les structures d'hospitalisation à domicile.

Nous nous permettons, ici, une digression en abordant le point 5 de cette mesure, la coopération sanitaire. Les Groupements de Coopérations Sanitaires (GCS) remplacent tous les autres types de coopérations existant précédemment. Un GCS favorise la coopération entre les différents acteurs de santé.

Le 1^{er} janvier 2002 est entrée en vigueur l'Allocation Personnalisée d'Autonomie (APA). Cette allocation est destinée aux personnes de plus de 60 ans en perte d'autonomie pour favoriser le maintien à domicile. En 2006 a été adopté un plan de solidarité « grand âge » qui consiste à créer des places de Services de Soins Infirmiers À Domicile (SSIAD) pour répondre aux besoins croissants d'une population dont l'espérance de vie augmente comme décrit dans la partie précédente. En 2006, 87000 places de SSIAD étaient disponibles, l'objectif est d'augmenter la capacité d'accueil à 232000 places à l'horizon 2025.

En 2003, dans un rapport de l'IRDES, Aligon et al. (2003) évaluent une journée de prise en charge en HAD à environ 140€ par jour. Dans une étude de 2010, la fédération hospitalière de France évalue ce même coût à 198€. De plus, dans l'étude citée en introduction « Soins de réhabilitation et accompagnement : une analyse comparative des coûts d'hospitalisation à domicile et en établissement », le coût d'une journée en HAD est 40% inférieur à celui d'une journée en établissement pour des soins comparables.

L'ensemble de ces mesures, dictées par l'évolution de la population, a favorisé le développement des structures de maintien à domicile. Ainsi, de nombreux types de structures ont vu le jour comme nous allons le voir à présent en insistant particulièrement sur les deux types qui nous intéressent ici.

1.3 Les structures de maintien à domicile

Comme nous l'avons démontré jusqu'à maintenant, le maintien à domicile est en plein essor. Nous avons essayé de lister les structures qui favorisent le maintien à domicile en France. Elles appartiennent à deux domaines distincts : médical et médico-social.

1.3.1 Structures médicales

Pour commencer, nous avons les structures d'**Hospitalisation À Domicile (HAD)** qui peuvent être de statuts variés, publics ou privés (à but non lucratif ou commercial), et rattachées à un établissement hospitalier ou autonomes (associatifs ou mutualistes par exemple). Ce sont des structures alternatives de soins à l'hospitalisation qui permettent d'assurer au domicile du patient des soins médicaux et paramédicaux importants pour une durée limitée mais renouvelable en fonction de l'évolution de l'état de santé du patient. L'objectif est d'éviter voire de raccourcir une hospitalisation classique en établissement.

Depuis 2009, elles sont considérées comme des établissements de santé et sont certifiées par la haute autorité de santé dans les mêmes conditions que les établissements hospitaliers. Les patients sont admis sur prescription médicale du médecin traitant et accord du patient et de la famille. Le patient doit remplir un des critères suivants :

- être déjà hospitalisé et le médecin estime que les soins peuvent être poursuivis à domicile,
- ne pas être hospitalisé mais le médecin estime que son état ne nécessite pas un séjour à l'hôpital.

De plus, le logement du patient doit être compatible avec une hospitalisation à domicile, une enquête est parfois nécessaire. Il faut que les soins continus concernent des patients ayant des pathologies évolutives sur une durée non déterminée au préalable ou que cela concerne des soins de réadaptation au domicile après la phase aiguë d'une pathologie. Les dix-sept modes de prise en charge sont définis par la circulaire DH/EO 2 n° 2000-295 du 30 mai 2000. Le nombre de modes de prise en charge principale évolue en 2010 pour passer à vingt-deux :

- | | |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| - assistance respiratoire, | - rééducation neurologique, |
| - nutrition parentérale, | - surveillance post chimiothérapie anticancéreuse, |
| - traitement par voie veineuse : anti-infectieux ou autre, | - soins de nursing lourds, |
| - soins palliatifs, | - éducation du patient et de son entourage, |
| - chimiothérapie anticancéreuse, | - surveillance de radiothérapie, |
| - nutrition entérale, | - transfusion sanguine, |
| - prise en charge de la douleur, | - surveillance de grossesse à risque, |
| - autres traitements, | - retour précoce à domicile après accouchement, |
| - pansements complexes et soins spécifiques (stomies compliquées), | - post-partum pathologique, |
| - post-traitement chirurgical, | - prise en charge du nouveau-né à risque, |
| - rééducation orthopédique, | - surveillance d'aplasie. |

Les modes de prise en charge supplémentaires sont liés aux activités entourant la grossesse (pré et post-partum). Un patient peut être suivi pour plusieurs prises en charge. Les soins au domicile des patients sont réalisés par des médecins, infirmiers, aide-soignants, kinésithérapeutes, ... Les soignants dépendent de la structure de HAD ou sont libéraux.

Un service de HAD est dirigé par un médecin coordonnateur qui décide avec son équipe de l'admission d'un patient et définit les soins à réaliser suivant une prescription médicale. Ensuite, le cadre de santé coordonne les interventions des professionnels et s'assure de la qualité des soins.

1.3.2 Structures sociales et médico-sociales

Les structures sont nombreuses et appartiennent au domaine public ou privé parmi lesquelles nous trouvons : SSIAD (Services de Soins Infirmiers À Domicile), SSAD (Service de Soutien À Domicile), IAD (Intervenant À Domicile), SEMAD (Service d'Entraide et de Maintien À Domicile), CAMAD (Centre Aide et Maintien À Domicile), SESSAD (Service d'Éducation Spéciale et de Soins À Domicile), SAPHAD (Service d'Accompagnement pour Personnes Handicapées, Adultes, À Domicile), ...

Dans nos travaux, nous nous concentrons sur les **Services de Soins Infirmiers À Domicile (SSIAD)** qui sont régis par le décret n°2007-793 du 9 mai 2007 - art. 4 JORF 11 mai 2007. Ils assurent, sur prescription médicale, des prestations de soins infirmiers sous la forme de soins techniques ou de soins de base et relationnels, auprès de :

- personnes âgées de soixante ans et plus, malades ou dépendantes ;
- personnes adultes de moins de soixante ans présentant un handicap ;
- personnes adultes de moins de soixante ans atteintes des pathologies chroniques mentionnées au 7° du I de l'article L. 312-1 ou présentant une affection mentionnée aux articles 3° et 4° de l'article L. 322-3 du code de la sécurité sociale.

Ces services sont réalisés à domicile ou dans les établissements non médicalisés pour personnes âgées et pour personnes adultes handicapées mentionnés aux 6° e 7° du I de l'article L. 312-1 et dans les établissements mentionnés aux I bis, II et III de l'article L. 312-12. Les personnes prises en charge souffrent d'une perte d'autonomie plus ou moins importante.

La perte d'autonomie est classée suivant 6 groupes déterminés à l'aide de la grille nationale **Autonomie Gérontologie Groupes Iso-Ressources (AGGIR)**¹. Ces groupes caractérisent le niveau de dépendance d'un patient :

GIR1 (Groupe Iso-Ressource 1) correspond à des personnes confinées au lit ou au fauteuil, dont les fonctions mentales sont gravement altérées ou qui nécessitent une présence continue d'intervenants ou des personnes en fin de vie.

GIR2 regroupe les personnes confinées également au lit ou au fauteuil, dont les fonctions mentales ne sont pas totalement altérées et qui nécessitent une prise en charge pour la plupart des activités de la vie courante ou des personnes dont les facultés mentales sont altérées mais qui sont capables de se déplacer et qui nécessitent une surveillance permanente.

GIR3 correspond à des personnes ayant conservé leur autonomie mentale, partiellement leur autonomie locomotrice, mais qui ont besoin quotidiennement et plusieurs fois par jour d'une aide pour les soins corporels.

GIR4 caractérise les personnes qui n'assument pas seules leur transfert et ont besoin d'aide pour la toilette et l'habillage mais qui peuvent se déplacer seules à l'intérieur d'un logement ou des personnes qui n'ont pas de problèmes locomoteurs mais qui doivent être aidées pour les soins corporels et les repas.

GIR5 regroupe les personnes ayant seulement besoin d'une aide ponctuelle pour la toilette, la préparation des repas et le ménage.

GIR6 concerne les personnes autonomes pour les actes essentiels de la vie courante.

Un SSIAD prend en charge des personnes classées dans les groupes GIR1 à GIR4.

Une personne est affectée à un groupe suivant un questionnaire proposé par la caisse d'assurance maladie. Selon une étude réalisée par Chevreul et al. (2009) les groupes GIR1 et GIR2 représentent 42,4% des personnes prises en charge par un SSIAD et 53,5% sont GIR3 ou GIR4 (figure 1.3). Il existe d'autres échelles pour évaluer la dépendance comme l'indice de Karnofsky ou la grille AVQ (Activité de la Vie Quotidienne). Cette dernière est principalement utilisée par les assurances dépendances.

L'objectif du SSIAD est de permettre aux personnes de maintenir le plus longtemps possible leur autonomie et de continuer à vivre à leur domicile, aider les personnes à mieux vivre leur dépendance

1. <http://vosdroits.service-public.fr/particuliers/F1229.xhtml>

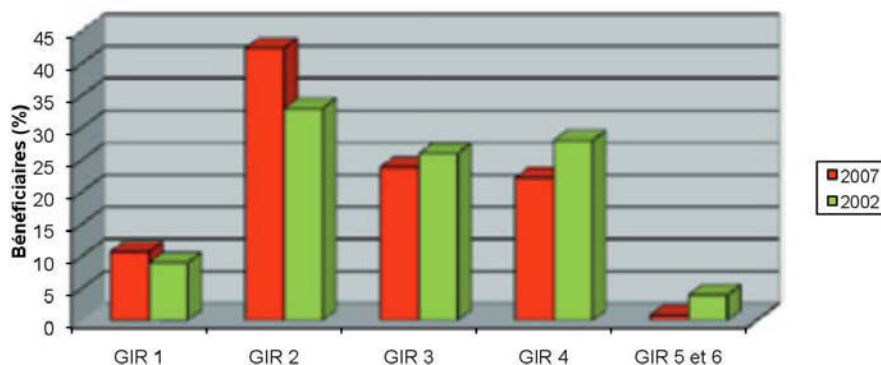


Figure 1.3 – Répartition des personnes prises en charge suivant la grille AGGIR

au quotidien, faciliter le retour à domicile après une hospitalisation ou apporter soutien et conseils aux familles et à l'entourage.

Les SSIAD sont composés d'infirmiers et d'aides-soignants réalisant les visites auprès des personnes prises en charge, d'un infirmier coordonnateur, d'un directeur et d'une secrétaire. Les fonctions administratives remplies par l'infirmier coordonnateur sont :

- l'accueil des personnes et de leur entourage ;
- l'évaluation des besoins de soins de ces personnes au moyen de visites à leur domicile, afin d'élaborer et de mettre en œuvre les projets individualisés de soins ;
- la coordination des professionnels (médecins, infirmiers, aides-soignants, kinésithérapeutes, ...).

Dans un rapport intitulé « Les patients en service de soins infirmiers à domicile (SSIAD), le coût de leur prise en charge et ses déterminants » Chevreul et al. (2009) évaluent la part des différentes tâches réalisées dans un SSIAD. Les tâches administratives et de coordination représentent 85% de l'activité du coordonnateur, les 15% restants sont consacrés aux activités de soins. Les activités de soins sont principalement réalisées par des infirmiers et des aides-soignants. La répartition de l'activité de soins est la suivante : 80% sont réalisés par les aides-soignants, 7% par des infirmiers salariés et le reste par des personnels libéraux.

2 Contexte scientifique

Bertels et Fahle (2006) proposent un résumé des contraintes à intégrer lorsque l'on souhaite travailler sur des problèmes d'organisation de soins à domicile dans des services de HAD. Les auteurs se placent dans le cadre où seuls des infirmiers réalisent les tournées pour dispenser les soins. La figure 1.4, réalisée par les auteurs, synthétise cela.

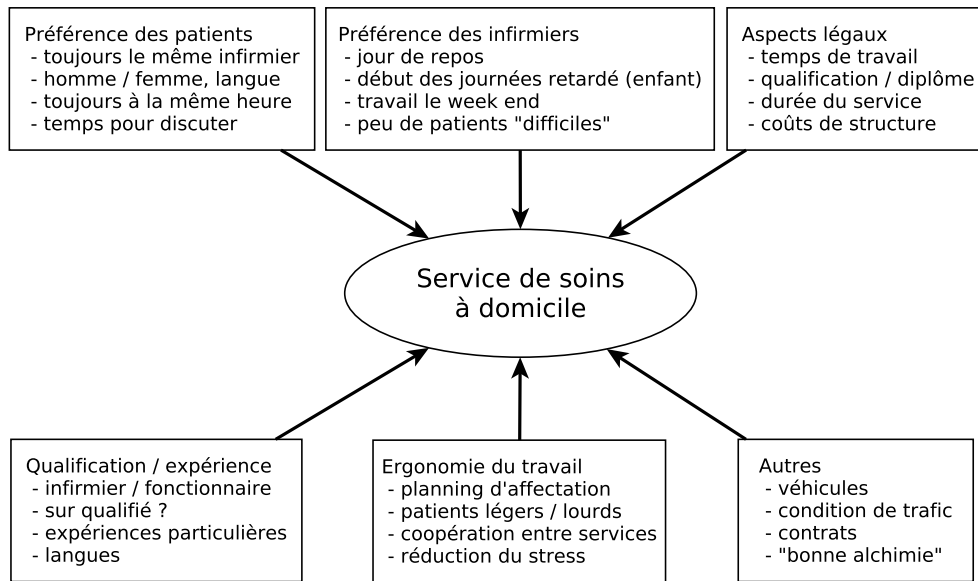


Figure 1.4 – Résumé des catégories de contraintes - soins à domicile, traduit de (Bertels et Fahle 2006)

La première catégorie de contraintes concerne la **préférence des patients**. Un patient peut choisir d'être soigné par une femme plutôt qu'un homme ou inversement. Un patient peut exprimer une préférence vers un infirmier qui parle la même langue que lui ou que ce soit toujours le même infirmier, toujours à la même heure qui lui rende visite. Suivant la pathologie du patient, il peut être nécessaire de prendre du temps pour discuter avec lui en plus des soins à prodiguer (temps social).

La seconde catégorie concerne la **préférence des infirmiers**. Suivant sa situation personnelle, un infirmier peut exprimer une préférence pour un jour de repos dans la semaine, travailler le week-end ou définir des horaires décalés pour s'occuper de jeunes enfants, par exemple. Du point de vue professionnel, un infirmier peut émettre le souhait d'avoir dans sa tournée peu de patients difficiles.

Le temps de travail, la durée de service, la compétence ou le diplôme requis et les coûts de structure sont regroupés dans la troisième catégorie nommée **aspects légaux**. Cet aspect intègre également les diplômes nécessaires pour travailler dans une structure d'hospitalisation à domicile.

La catégorie **qualification/expérience** concerne les infirmiers. Cette catégorie diffère des préférences. Elle est plus axée sur le savoir-faire de l'infirmier et non sur ses choix. Un infirmier est caractérisé par ses compétences, son expérience et les langues qu'il maîtrise. Enfin, cette catégorie intègre également les problèmes de sur-qualification. Dans une structure d'hospitalisation à domicile, les infirmiers peuvent être amenés à réaliser des soins de nursing par exemple qui relèvent plus du métier d'aide-soignant.

La catégorie **ergonomie du travail** concerne l'organisation du travail des infirmiers. La notion de patients légers ou lourds peut être mise en relation avec le niveau de dépendance décrit dans la partie 1.3.2. Un patient léger serait alors un patient à faible niveau de dépendance.

Enfin, la dernière catégorie **autres** regroupe les choix matériels qui peuvent s'opérer : le choix du mode de transport (voiture, vélo, transport en commun, ...), les contrats des infirmiers et les conditions de trafic qui vont influencer sur les temps de déplacement suivant les heures de la journée. Dans cette catégorie rentre également une notion moins quantifiable qui est la bonne alchimie entre structure de travail, infirmier et patient.

3 Présentation des structures locales

Pour nos travaux, nous avons eu trois interlocuteurs : le SSIAD de Montluçon et deux services de HAD. Le SSIAD de Montluçon est une structure dépendant de la mairie et pilotée par le cadre de santé du service de HAD de l'hôpital. Nous avons rencontré deux services de HAD de statuts différents. Le premier, appelé HAD63, est une structure de HAD privée à but non lucratif située aux abords de Clermont-Ferrand dans le Puy-De-Dôme. La HAD63 est membre d'un Groupement de Coopération Sanitaire (GCS) qui regroupe trois structures proches de Clermont-Ferrand. C'est dans le cadre du GCS que sont apparus des problématiques logistiques que nous allons détailler ensuite. Le second service de HAD rencontré est le service de l'hôpital de Montluçon dans l'Allier, structure publique.

3.1 Groupement de Coopération Sanitaire de Cébazat (GCS)

Dans cette partie, nous allons présenter le GCS de Cébazat à travers ses membres : HAD63, AURA Auvergne et le centre Michel Barbat. Nous aborderons ensuite la Pharmacie à Usage Interieur (PUI) qui dépend de cette structure.

3.1.1 Composition du GCS

Le Groupement de Coopération Sanitaire (GCS) regroupe trois établissements de santé :

- le service d'Hospitalisation À Domicile HAD63 situé à Cébazat

L'HAD63 est un établissement de santé privé à but non lucratif géré par l'Association de Gestion des Services de Soins en Auvergne (AGESSA). Les premiers patients ont été accueillis en février 2003 après une autorisation d'ouverture obtenue le 23 octobre 2001 auprès de l'Agence Régionale d'Hospitalisation Auvergne. La capacité d'accueil est alors de 25 lits. Elle a été certifiée en novembre 2006 par la Haute Autorité de Santé (HAS). Sur prescription médicale, l'HAD63 propose une prise en charge ponctuelle de patients pour une durée déterminée. Le territoire opérationnel de l'HAD63 couvre une grande partie du département du Puy de Dôme (figure 1.5). Actuellement, le service prend en charge environ 60 patients qui y séjournent 3 semaines en moyenne.

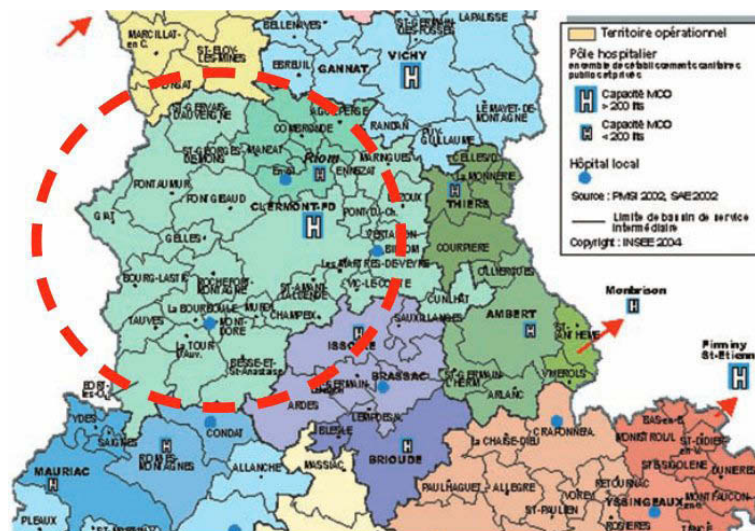


Figure 1.5 – Périmètre de prise en charge de la HAD63

- l'Association pour l'Utilisation du Rein Artificiel (AURA) située à Cébazat

Comme indiqué sur leur site internet, "L'AURA Auvergne a pour mission de se consacrer aux besoins de santé de la population sur un territoire s'étendant de l'Auvergne au Nivernais." Cette

association propose plus particulièrement du matériel pour la réalisation de dialyse à domicile et la prise en charge de personnes relevant du service de HAD. L'association a vu le jour en janvier 1976 et elle a ouvert un service de HAD en novembre 2009. Les prises en charge concernent principalement des maladies chroniques. 130 patients sont pris en charge pour de la dialyse à domicile. Ils sont localisés dans la région Auvergne ainsi que dans le département de la Nièvre (figure 1.6). Quelques patients sont dans les départements limitrophes (Creuse, Loire, ...).

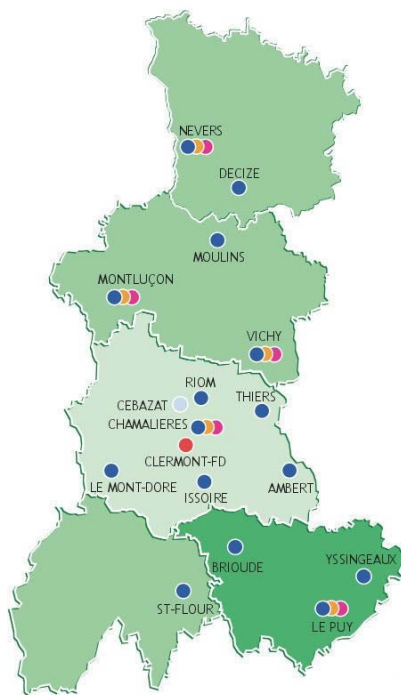


Figure 1.6 – Périmètre de prise en charge de AURA Auvergne

- le centre Michel Barbat situé à Beaumont

Ce centre est un centre de rééducation fonctionnelle, de réadaptation et de réhabilitation pour des personnes âgées qui a ouvert ses portes en juillet 1981. Les principaux motifs d'admission concernent les suites de chirurgie orthopédique et réparatrice, la rhumatologie, les hémiplésies ou amputation de membre inférieur par exemple.

AURA Auvergne et le centre M. Barbat possédaient chacun une Pharmacie à Usage Interne (PUI) pour la gestion des médicaments et du matériel médical. D'après l'article L5126-1 du code de la santé publique, l'activité des PUI est limitée à l'usage particulier des patients présents dans les établissements de santé ou médico-sociaux où elles ont été constituées ou qui appartiennent au groupement de coopération sanitaire ou au syndicat interhospitalier, dans les hôpitaux des armées ou dans les installations de chirurgie esthétique. Une PUI commune aux trois entités du GCS a été ouverte le 1^{er} février 2013 sur la base des 2 PUI existantes. Les 2 équipes sont regroupées sur un même site pour mettre en commun les approvisionnements, le stockage et la distribution des médicaments.

3.1.2 Pharmacie à Usage Interne (PUI) du GCS

La réglementation d'une pharmacie à usage intérieur est définie dans le chapitre VI du code de santé publique (article L. 5126-1). Une pharmacie à usage interne est chargée de répondre aux besoins pharmaceutiques de l'établissement où elle est créée et notamment d'assurer la gestion, l'approvisionnement, la préparation, le contrôle, la détention et la dispensation des médicaments ou produits ainsi

que des dispositifs médicaux stériles et le cas échéant des médicaments expérimentaux et d'en assurer la qualité.

Ainsi, dans le GCS, la préparation et la distribution des médicaments est réalisée par la pharmacie. Les patients de l'HAD63 sont livrés une fois par semaine suivant la prescription faite par le médecin traitant de chaque patient. Ensuite, les patients de l'AURA Auvergne pour la dialyse à domicile sont livrés une fois par mois. A cela s'ajoute la distribution de produits pour les 14 centres de dialyse AURA (Nevers, Le Puy, Thiers, Ambert, ...). Les quantités de produits sont importantes et volumineuses avec un conditionnement en palette. Enfin, pour le centre Michel Barbat, les médicaments sont préparés pour chaque patient chaque jour sous la forme de piluliers. Un aller-retour est réalisé chaque jour de la PUI vers le centre pour livrer les piluliers. Les médicaments sont accompagnés de Dispositifs Médicaux Stériles (DMS) nécessaires à la dispensation des soins. Pour résumer, la PUI doit préparer et livrer des volumes très différents, allant de piluliers à plusieurs palettes.

Chacun des établissements possède des ressources matérielles ou humaines dédiées pour réaliser les livraisons à des fréquences différentes. Nous détaillons les ressources disponibles pour chaque structure du GCS.

L'AURA Auvergne met à disposition à l'usage de la pharmacie un poids lourd de 19 tonnes (PL), deux fourgons (F) et un petit utilitaire (PU). Les livraisons sont effectuées par 3 chauffeurs/livreurs (CL) dont deux possèdent le permis poids lourd (P.PL). Les poids lourds effectuent la livraison des 14 centres de dialyse à raison de 1 à 2 centres par tournée. Ces livraisons sont régulières et programmées. Les fourgons servent à la distribution des médicaments et des DMS chez les patients dont la dialyse est réalisée à domicile. Le maximum de poids transportable par un fourgon est de 1200 kg. Les livraisons sont réalisées une fois par mois pour chacun des patients. Le poids moyen d'une livraison est de 243kg pour un minimum de 100kg et un maximum de 800kg. Les fourgons servent également à collecter les produits restants lors de la fin de la prise en charge des patients. Les tournées sont organisées par le pharmacien gérant et une préparatrice sur des cycles de 4 semaines. Les services d'hospitalisation à domicile de AURA et HAD63 ont à disposition deux fourgons bi-compartment et deux chauffeurs/livreurs. Deux flux sont traités : la **distribution** des médicaments et des DMS au domicile des patients et la **collecte** des déchets pour les patients de la HAD63. Cela représente environ 60 livraisons et/ou collecte par semaine.

Enfin, le centre Michel Barbat dispose d'un fourgon bi-compartment (F2C). La tournée est réalisée une fois par jour à heure fixe par un salarié d'AURA. Elle est composée de la livraison des piluliers et des DMS (compartment 1) et la collecte des plateaux-repas (préparés au centre Michel Barbat) pour le personnel de la PUI (compartment 2). Elle dure environ 1 heure.

Le tableau 1.1 résume les ressources disponibles pour chacun des trois établissements de santé et le tableau 1.2 les flux considérés. A l'heure actuelle, les circuits de distribution sont indépendants pour chaque structure du GCS et construits à la main. Lors de l'entrée de nouveaux patients dans l'un des deux services de HAD, un dépannage est effectué pour la livraison du matériel et des premiers médicaments, puis le patient est intégré dans le planning de distribution.

	Ressources humaines		Ressources matérielles			
Établissements	P.PL	CL	PL	F2C	F	PU
Dialyse AURA	2	1	1		2	1
HAD63 et AURA		2		2		
Centre M. Barbat		1		1		

P.PL : permis poids lourd, CL : chauffeur-livreur

PL : Poids Lourd, F2C : fourgon bi-compartment, F : fourgon, PU : petit utilitaire

Tableau 1.1 – Récapitulatif des ressources disponibles pour les livraisons du GCS

Établissement	Livraison	Collecte	Fréq.
Dialyse AURA	Centre AURA : 12 à 14 palettes	-	Programmée et régulière généralement mensuelle
Dialyse AURA	Domicile : Méd + DMS	Produits non utilisés	1 livraison collecte/mois
HAD63 et AURA	Domicile : Méd + DMS	Déchets	60 livraisons/semaine
Centre M. Barbat	Centre Barbat : pilulier + DMS	Plateaux-repas	1 fois/j.

Tableau 1.2 – Flux GCS

Après avoir présenté le GCS, nous décrivons ensuite les structures de maintien à domicile présentes dans la ville de Montluçon.

3.2 Structure de maintien à domicile à Montluçon

La ville de Montluçon possède deux services de maintien à domicile que nous allons décrire. Le premier est un service d'Hospitalisation À Domicile qui dépend du centre hospitalier de la ville. Le second, qui dépend de la mairie, est un Service de Soins Infirmiers À Domicile.

3.2.1 Service d'Hospitalisation À Domicile (HAD)

Le centre hospitalier de Montluçon a ouvert en 2007 un service de HAD de 10 lits. Actuellement, le service prend en charge en moyenne simultanément 15 patients et à ce jour il est au maximum de 20. L'objectif de l'hôpital est d'atteindre une trentaine de patients pris en charge.

Ce service est composé d'un médecin coordonnateur, d'un cadre de santé, de huit infirmiers et d'un coursier. Les soignants ont 4 véhicules à disposition pour aller au domicile des patients. Les patients, qui résident dans un rayon de 15 km autour de l'hôpital, sont pris en charge par les infirmiers du service de HAD. En revanche, un patient résidant hors de cette zone sera pris en charge intégralement par des soignants libéraux. Cependant, dans le cadre de prise en charge de cas lourds, les interventions sont réalisées exclusivement par le personnel de la HAD. En cas de manque de ressources, la prise en charge de cas lourds peut être effectuée par une équipe mixte (un infirmier interne et un infirmier libéral).

La durée moyenne de séjour dans le service de HAD est de onze jours. Chaque patient est vu au moins une fois par jour par un membre de l'équipe soignante et une réunion a lieu une fois par semaine entre le patient et le cadre de santé. Lors de la pré-admission, le médecin détermine les soins à effectuer suivant la prescription médicale. Cela permet de déterminer les besoins en matériels (dispositifs médicaux, médicaments, consommables). Ensuite, la pharmacie prépare le matériel qui sera acheminé au domicile du patient par le coursier ou le cadre de santé lors de la réunion hebdomadaire. Pendant toute la durée de la prise en charge, la HAD fournit tout le matériel et les médicaments nécessaires.

Actuellement, les tournées du personnel soignant sont construites chaque jour pour le lendemain par le cadre de santé.

3.2.2 Service de Soins Infirmiers À Domicile de Montluçon (SSIAD)

Le SSIAD prend en charge 150 personnes réparties sur quatre communes : Montluçon, Domérat, Désertines et Saint Victor. Le SSIAD de Montluçon est composé de 15 aides-soignants qui réalisent chaque jour 2 tournées (matin et après-midi) pour prodiguer des soins chez les personnes prises en charge. Une à deux visites par jour sont réalisées au domicile des personnes prises en charge du lundi au samedi. En plus, une partie des personnes prises en charge reçoit une visite le dimanche. La construction des tournées est réalisée en fin de journée pour le lendemain par l'infirmier coordonnateur. Il répartit les visites des 150 personnes sur 15 tournées. Les aides-soignants prennent connaissance de leur tournée le matin à 7h puis débutent leur tournée. En cas d'absence imprévue, l'infirmier coordonnateur réaffecte

au mieux les visites sur les tournées des aides-soignants présents. Lors du passage au domicile de chaque personne prise en charge, le soignant remplit un diagramme de soins qui récapitule les activités effectuées. Les activités sont découpées en plusieurs catégories. Certaines catégories sont à nouveau subdivisées, nous donnons quelques exemples dans la liste suivante :

- soins de base,
 - hygiène et confort,
 - toilette lit,
 - toilette lavabo,
 - aide habillage,
 - hygiène bucco-dentaire,
 - ...
 - alimentation,
 - installation repas
 - élimination,
 - bassin/urinal,
 - change complet/protection
 - accompagnement WC
 - ...
 - locomotion,
 - aide au lever,
 - aide à la marche,
 - aide au coucher,
 - lève-malade,
 - chaise percée,
 - ...
- gestion des risques,
 - prévention escarres,
 - prévention d'infection,
 - contention,
 - télé-alarme,
 - ...
- soins relationnels et éducatifs,
 - éducation patient/famille,
 - information patient/famille,
 - écoute,
 - ...
- soins techniques,
 - pansement simple,
 - pansement complexe,
 - alimentation entérale,
 - pilulier,
 - ...
- divers,
 - patch,
 - collyre,
 - inhalateur.

Nous constatons que les visites de patients peuvent avoir des motivations très variées, des soins de base ou techniques, de la prévention ou bien le développement des relations avec la famille de la personne prise en charge. De plus, ces interventions nécessitent des compétences différentes de la part des soignants. Par exemple, l'alimentation entérale ne demande pas les mêmes compétences que l'aide au lever. Ces deux interventions doivent pourtant être réalisées aux domicile des personnes prises en charge par des ressources différentes dans le cadre du SSIAD.

Nous avons décrit le fonctionnement de trois structures locales de maintien à domicile dont l'existence est récente. Ces structures se développent et ne possèdent pas une expérience logistique importante. Cela soulève des problématiques logistiques que nous abordons dans la suite de ce mémoire.

II Problématique

Que ce soient des problématiques managériales, gestionnaires, ou encore organisationnelles, nous nous intéressons en premier lieu à la conception d'outils d'aide à la décision dans le but de proposer des solutions aux décideurs. L'impact de cet outil sera double : pour le personnel (soignant et non-soignant) dans son activité quotidienne et ensuite pour les patients pour la qualité de leur prise en charge. La littérature est riche dans l'organisation des structures de maintien à domicile allant de l'organisation globale au pilotage du quotidien. Nous présentons dans un premier temps les problématiques traitées dans la littérature. Nous terminons par la problématique liée aux structures locales de maintien à domicile.

1 Problématiques rencontrées dans le maintien à domicile

Des études sont menées afin de répondre aux différentes contraintes qu'impose l'environnement économique. Les décisions d'aménagement, de changement ou plus radicalement de création de nouvelles organisations logistiques se prennent à différents niveaux (Aleksy et al. 2006) :

- stratégique qui correspond au problème de conception et de construction d'une organisation de maintien à domicile ;
- tactique qui correspond à l'utilisation du réseau, et à l'adéquation ressources/besoins ;
- opérationnel qui concerne le pilotage d'une organisation de maintien à domicile à court terme.

Ces différents horizons demandent des niveaux de granularité différents pour toute étude de modélisation réalisée pour construire des outils d'aide à la décision. Il est intéressant de coupler la vue temporelle avec les différents types de modélisation et de simulation envisageables sur l'organisation de maintien à domicile. Pour ce faire, nous reprenons les approches dégagées par Chabrol et al. (2006). Ainsi trois approches permettent de caractériser dans le cadre d'une approche de modélisation par les flux, les types de modélisation : macroscopique , mésoscopique et microscopique.

- Le niveau macroscopique désigne le niveau supérieur. Le système est appréhendé dans sa globalité, l'ensemble des patients forment un tout, comme l'ensemble des ressources humaines ou matérielles. L'activité est également fortement agrégée.
- Le niveau microscopique désigne le niveau le plus fin. Chaque élément est considéré dans son individualité comme entité atomique.
- Le niveau mésoscopique est un niveau intermédiaire. Ce niveau permet de regrouper une ou plusieurs individualités ayant des caractéristiques communes et de représenter un sous-ensemble de la vision macroscopique.

Le tableau 1.3 montre que l'on peut coupler ces trois approches avec les différents horizons temporels.

	Macroscopique	Mésoscopique	Microscopique
Stratégique	Conception d'une organisation de services de maintien à domicile <i>Développement de la planification sanitaire</i> , (Henrard 2005)	Conception de processus <i>Schéma Régional d'Organisation Médico-Sociale</i> , (Lernout et al. 2008)	Conception d'activité
Tactique	Configuration d'une organisation de services de maintien à domicile <i>Modélisation de service de soins à domicile</i> (Bashir 2013)	Configuration de processus <i>Dimensionnement de ressource</i> , (De Angelis 1998)	Configuration d'activité <i>Affectation des personnels soignants aux patients</i> , (Borsani et al. 2006)
Opérationnel	Pilotage d'une organisation de services de maintien à domicile <i>Équilibrage de l'activité du personnel</i> (Bredström et Rönnqvist 2008)	Pilotage de processus	Pilotage d'activité <i>Construction de tournées de personnels soignants</i> , Gayraud et al. (2014a)

Tableau 1.3 – Couplage horizon temporel et approche de modélisation

Dans l'état de l'art de ses travaux de thèse, Bashir (2013) a décrit un ensemble de problématiques lié à l'hospitalisation à domicile. Elles sont classées suivant différentes catégories comme par exemple :

- localisation et affectation (*location allocation problem*)

Un problème de localisation et affectation permet de déterminer la localisation des sites ainsi que les patients à leurs affecter en assurant une couverture de tous les patients tout en minimisant les coûts.

- dimensionnement et affectation de ressources

Ce problème consiste à déterminer le nombre de soignants à affecter à un site en tenant compte du nombre et du type de ressources matérielles disponibles sur le site, des compétences des ressources ainsi que la demande prévisionnelle du site tout en maximisant la qualité de service et minimisant les coûts.

- distribution

Ce problème est généralement modélisé sous la forme d'un « multiple travelling salesmen problem with time windows », il consiste à définir les tournées à réaliser par chaque ressource (un véhicule dans les problèmes de tournées de véhicules) afin d'effectuer une livraison chez un patient (une ville dans un problème de tournées de véhicules). Une tournée est une suite ordonnée de villes à visiter, elle débute et se termine dans un dépôt.

- partitionnement,

Un problème de partitionnement consiste à diviser une zone géographique en un nombre prédéfini de sous-zones contiguës tout en minimisant un critère pré-défini (équilibre en nombre de patients, pathologies identiques, ...).

- étude comparative de coût.

L'objectif est de réaliser une étude comparative de différents scenarii (organisation, pilotage, ...) suivant des critères économiques. Le projet Organisation des Soins À Domicile (OSAD), débuté en 2007 dans le cadre du GdR MACS en région Rhône-Alpes, a pour cible principale les structures de HAD et a pour problématique :

Comment améliorer la prise en charge des patients dans le contexte d'une hospitalisation « hors les murs » ?

Les objectifs sont les suivants :

- améliorer le confort de la prise en charge,
- assurer aux patients une prise en charge sûre et d'une qualité au moins identique à celle offerte à l'hôpital,
- assurer un coût de la prise en charge inférieur ou égal à l'hospitalisation classique.

Ce projet a été présenté le 28 novembre 2012 lors d'un Journée Hospitalisation à domicile. Les problématiques qui sont ressorties se recoupent avec celles présentées dans la thèse de Bashir (2013),

- ingénierie du système de production des soins et des services,
- planification et ordonnancement de l'activité,
- gestion des ressources humaines,
- gestion de la logistique,
- pilotage de la performance.

Après avoir décrit le contexte local de nos travaux et les problématiques générales en lien avec le maintien à domicile, nous abordons la problématique qui va nous occuper jusqu'à la fin de ce mémoire.

2 Notre problématique

Quel que soit le type de structures de maintien à domicile, un ensemble de personnes prises en charge doit recevoir des soins qui sont prodigués par un ensemble de ressources. En effet, il est nécessaire de rendre visite aux personnes prises en charge, pour prodiguer des soins, pour livrer du matériel ou des médicaments voire collecter les déchets ou le matériel non utilisé à la fin de la prise en charge. Dans ce cadre, nous souhaitons proposer un outil d'aide à la décision afin d'organiser les tournées du personnel de la structure de manière à ce qu'elles satisfassent au mieux un ensemble de contraintes. Le personnel concerné peut être soignant (médecin, infirmier, aide-soignant, kinésithérapeute, ...) ou non-soignant (coursier, ...).

Pour construire une tournée de soins, le coordonnateur doit respecter un certain nombre de contraintes tout en ayant à l'esprit le respect des conditions de travail satisfaisantes pour le personnel :

- équilibrer les tournées selon :

- le nombre de patients visités,
 - le niveau de dépendance des patients (il faut répartir entre les tournées les patients les plus dépendants),
 - la longueur des tournées.
- respecter les pauses repas et les plannings de travail des soignants,
 - favoriser les visites pour lesquelles le personnel a développé une expérience spécifique.

N'oublions pas également le point de vue du patient en :

- respectant les périodes de disponibilité,
- favorisant les membres du personnel qu'il préfère.

Une spécificité du problème abordé concerne la nécessité d'avoir deux soignants présents pour réaliser certaines visites. En effet un patient à fort niveau de dépendance est plus difficile à manipuler pour les activités de soins et oblige la présence simultanée de deux soignants. Par conséquent, les tournées ne sont plus indépendantes les unes des autres et il faut envisager une synchronisation des tournées pour réaliser ces visites particulières. Sans contraintes de synchronisation, le problème se réduit à un m-TSP (multi-traveling salesman problem).

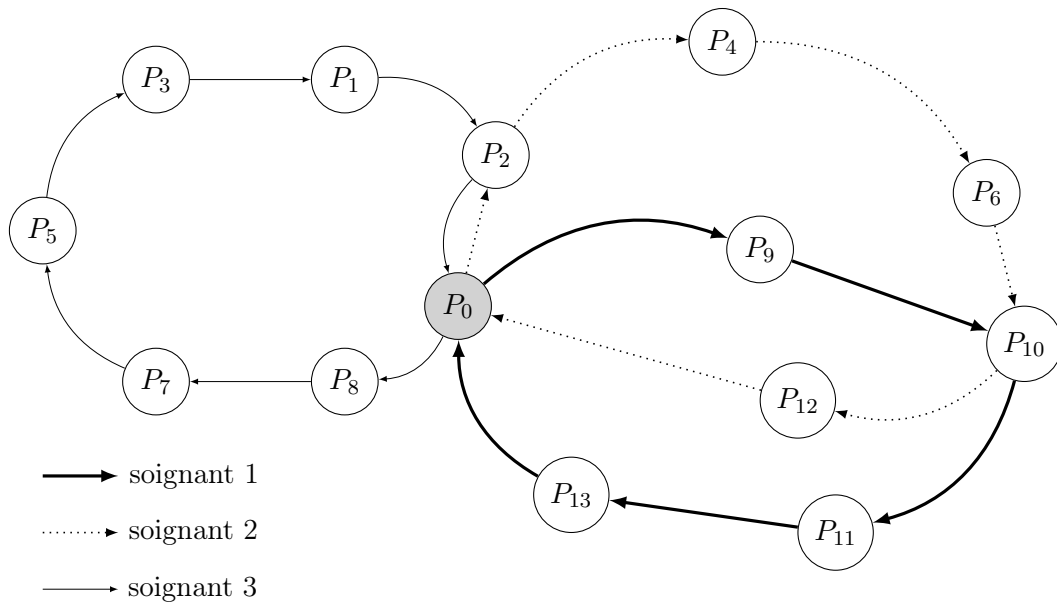


Figure 1.7 – Exemple de construction de tournées, 13 patients et 3 soignants

La figure 1.7 donne un exemple simplifié pour la construction des tournées dans le cas où 13 patients doivent être pris en charge par 3 soignants. Deux patients nécessitent deux soignants (P_2 et P_{10}). Les tournées doivent débuter et se terminer à P_0 . Le patient P_2 est pris en charge au même moment par les soignants 2 et 3, au début de la tournée du soignant 2 et en fin de tournée du soignant 3. Le diagramme de Gantt de la figure 1.8 montre les périodes de disponibilité des patients et les tournées des soignants. Sur le haut du diagramme, la partie a. correspond aux périodes de disponibilité de chaque patient pendant laquelle doit débuter les soins. Sur la partie basse, la partie b., nous représentons les tournées de chaque soignant. Les cases noires correspondent à la période de prise en charge du patient. Les cases en gris correspondent à la durée du trajet entre chaque patient. L'objectif est donc de proposer un outil d'aide à la décision pour la construction de tournées dans la cadre de structure de maintien à domicile.

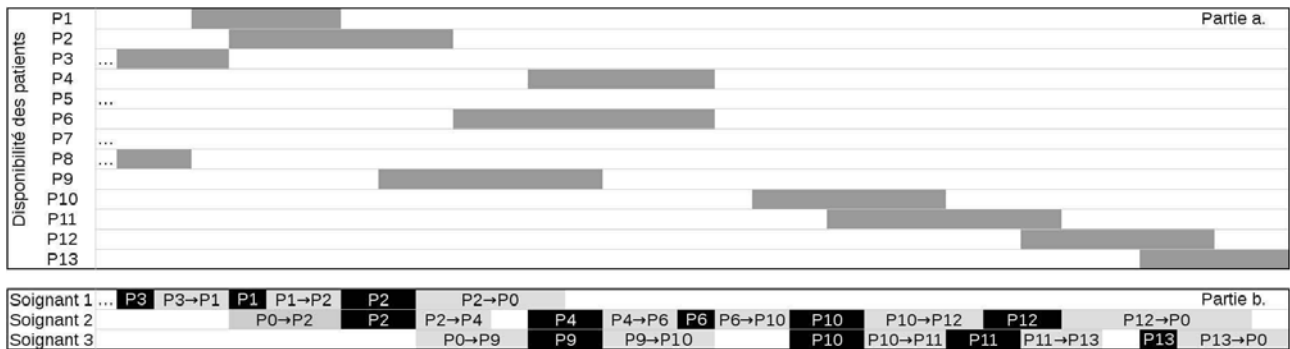


Figure 1.8 – Diagramme de Gantt - Disponibilité des patients et tournées des soignants

Conclusion

Le maintien à domicile trouve sa place dans la société depuis longtemps et devient de plus en plus légitime face à l'évolution d'une population qui vieillit. Nous avons vu que ce type de structures se développe sous l'impulsion des politiques économiques successives, que ce soit pour la dispensation de soins à domicile ou pour l'accompagnement de personnes dépendantes pour la réalisation des tâches quotidiennes. Les tâches réalisées par les soignants sont très diverses allant de gestes médicaux à l'accompagnement de l'entourage en passant par l'aide à la préparation ou la prise de repas. La réalisation de chacune de ces tâches implique aussi d'avoir le matériel nécessaire. Ce matériel peut être acheminé soit par le soignant lui-même soit plus fréquemment par un coursier ou un livreur lors de tournées spécifiques.

Depuis de nombreuses années, la littérature scientifique traite de l'organisation de soins dans un établissement hospitalier. En effet, cette littérature traite non seulement de l'organisation des soins mais également de toutes les activités de soutien comme la distribution des médicaments, des repas, de linge, ... Dans notre contexte, les patients ne sont plus situés dans une seule et même structure mais chacun se trouve à son domicile. Par conséquent, la problématique ne concerne plus uniquement l'organisation des soins mais également la construction de tournées pour les soignants, la livraison des médicaments et du matériel nécessaires pour les soins.

Nous avons ainsi évoqué les problématiques de la littérature ayant un lien direct avec l'organisation des structures de maintien à domicile telles que :

- la localisation des sites (HAD, SSIAD, ...),
- le dimensionnement et l'affectation des ressources aux sites,
- la modélisation de structure d'hospitalisation à domicile,
- la distribution des médicaments et du matériel,
- l'affectation des patients aux soignants et l'ordonnancement des activités de soins,
- l'étude comparative de coût.

Nous avons décidé de prendre en compte deux aspects importants pour la proposition de notre outil d'aide à la décision : le point de vue des conditions de travail des soignants et également la qualité de prise en charge des patients. Ceci implique de respecter un certain nombre de contraintes comme :

- l'équilibrage de tournées selon le nombre de patients pris en charge ou encore le degré de dépendance ;
- les horaires de travail des soignants (pause repas par exemple) ;
- l'expérience du personnel ;
- la disponibilité des patients ;
- la préférence du patient pour un soignant en particulier.

Le chapitre suivant aborde l'état de l'art des problèmes de construction de tournées dans le cadre de structures de soins à domicile.

Chapitre 2

L'organisation des tournées de soins à domicile dans la littérature

Sommaire

Introduction	41
I Proposition d'une classification et d'une notation pour les problèmes d'organisation de tournées de soins à domicile	42
1 Classification	42
1.1 Type de ressource	42
1.2 Activités synchronisées	43
1.2.1 Les contraintes de synchronisation dans les problèmes de tournée de véhicules	43
1.2.2 Les contraintes de synchronisation dans les problèmes de maintien à domicile	44
2 Notation	44
2.1 Champ α : Structure	44
2.2 Champ β : Règles de gestion	45
2.3 Champ γ : Critères de performance	46
II Revue de la littérature	47
1 Présentation des modèles mono-type	48
1.1 Modèles sans contraintes de synchronisation	48
1.1.1 De Angelis (1998)	48
1.1.2 Cheng et Rich (1998)	48
1.1.3 Bertels et Fahle (2006)	51
1.1.4 Akjiratikarl et al. (2007)	54
1.1.5 Trautsamwieser et Hirsch (2011)	55
1.1.6 Trautsamwieser et Hirsch (2014)	56
1.1.7 Gourc et al. (2013)	56
1.1.8 Morito et al. (2014)	57
1.1.9 Fikar et Hirsch (2014)	57
1.1.10 Riazzi et al. (2014)	58
1.1.11 Cattafi et al. (2012)	58
1.2 Modèle avec contraintes de synchronisation	59
1.2.1 Eveborn et al. (2006)	59
1.2.2 Thomsen (2006)	59
1.2.3 Bredström et Rönnqvist (2008)	63
1.2.4 Ben Bachouch et al. (2008)	65
1.2.5 Redjem et al. (2012)	65

2	Présentation des modèles multi-type	65
2.1	Modèle sans contraintes de synchronisation - Begur et al. (1997)	65
2.2	Modèle avec contraintes de synchronisation - Kergosien et al. (2009)	66
3	Synthèse des méthodes de résolution	67
4	Positionnement de notre problème dans la littérature	68
Conclusion		68

Introduction

Rais et Viana (2011) ont proposé un état de l'art sur l'utilisation de méthodes de recherche opérationnelle pour la résolution de problèmes d'optimisation en lien avec l'hospitalisation ou la dispensation de soins. Ils proposent une classification des problèmes suivant quatre catégories :

- la planification des services de santé qui regroupe :
 - les problèmes de localisation pour faciliter l'accès aux soins dans les zones rurales ou les pays en voie de développement,
 - les problèmes de couverture pour organiser des campagnes de vaccination ou positionner des véhicules d'urgence,
 - les problèmes de dimensionnement pour organiser un service d'urgence par exemple,
- la gestion opérationnelle des services de santé, thématique très étudiée en management qui intègre :
 - la planification des ressources,
 - la logistique (gestion des stocks de médicaments, allocation de matériel médical, distribution de matériels stériles entre sites d'un centre hospitalier)
 - l'organisation des rendez-vous des patients,
 - l'ordonnancement d'opérations chirurgicales,
- la pratique des soins qui rassemble des problématiques comme :
 - la planification de traitements comme les radiothérapies ou chimiothérapies,
 - le diagnostic de maladie,
 - le dépistage de complications liées à des pathologies comme le diabète,
- les soins préventifs et spécialisés, qui concernent par exemple :
 - l'affectation d'organes dans le cadre de greffes,
 - l'affectation de ressources pour un programme d'échanges multi-site afin de réduire les nouvelles infections de maladie comme le VIH,
 - l'évaluation des conséquences d'une attaque bio-terroriste.

L'organisation de tournées des soignants relève de la planification de ressources et concerne la gestion opérationnelle des services de santé et donc entre bien dans la classification proposée par Rais et Viana (2011).

Dans ses travaux de thèse, Ben Bachouch (2011) a identifié les problématiques de pilotage de structures de HAD suivantes, suite à l'étude d'un service de HAD drômois :

- la détermination des tournées des infirmiers des services de HAD,
- l'organisation de la distribution de médicaments (plusieurs passages sont parfois nécessaires pour distribuer tous les médicaments),
- la gestion des échanges d'informations dans le cas d'une modification de la prescription par exemple,
- la gestion des stocks de consommables déficiente qui entraîne un important retour de consommables en fin de prise en charge.

Parmi les problématiques décrites, nos travaux élargissent la construction de tournées des infirmiers de services de HAD à l'ensemble du personnel des structures de maintien à domicile.

L'objectif est de réaliser un état de l'art sur les problèmes d'optimisation relatifs aux tournées de véhicules dans un cadre de structure de maintien à domicile. Pour structurer notre travail, nous proposons une classification (cf. figure 2.1) suivant deux critères :

- un ou plusieurs types de ressources,
- la prise en compte ou non de contraintes de synchronisation.

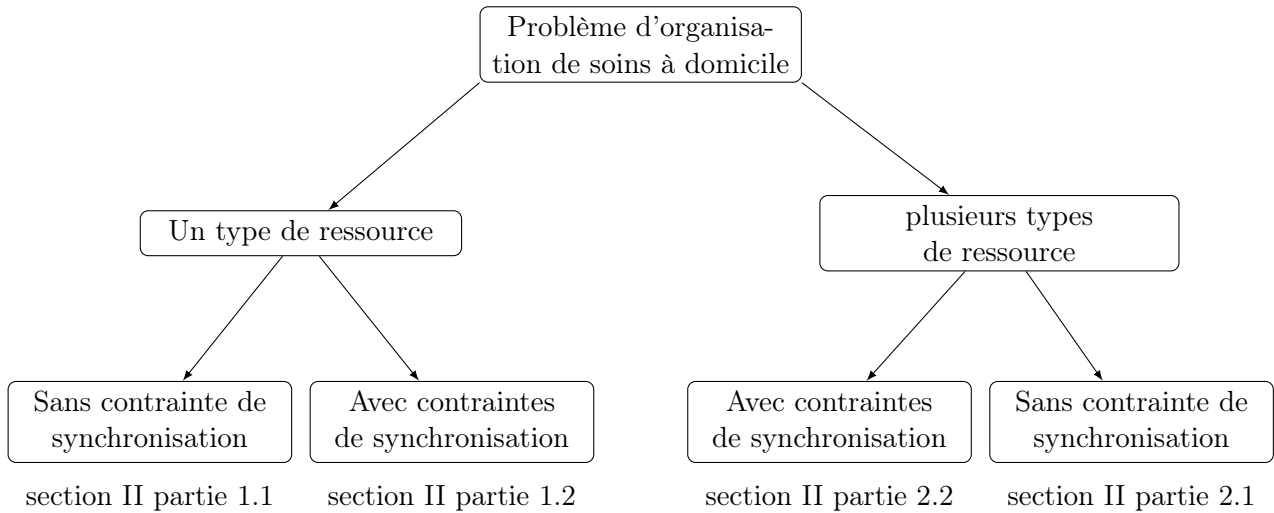


Figure 2.1 – Classification - problèmes d'organisation de soins à domicile

La figure 2.1 décrit le découpage et renvoie vers les sections concernées. Quant à la notation, elle s'inspire de la notation $(\alpha|\beta|\gamma)$ de Graham et al. (1979) pour les problèmes d'ordonnancement.

Ce chapitre est donc structuré de la manière suivante. Nous commençons par décrire la classification et la notation en lien avec les problèmes de dispensation de soins à domicile. Les modèles de la littérature sont présentés suivant la classification et la notation proposée. Ensuite, une synthèse des méthodes de résolution de la littérature est proposée. Pour conclure, nous positionnons le problème traité par rapport à la littérature décrite.

I Proposition d'une classification et d'une notation pour les problèmes d'organisation de tournées de soins à domicile

Dans cette partie, nous abordons la classification puis la notation proposées pour les problèmes de construction de tournées de soins à domicile.

1 Classification

Cette classification est réalisée suivant deux critères :

- un ou plusieurs types de ressources, critère choisi car il engendre une problématique liée à la compatibilité entre activités et ressources,
- la prise en compte ou non de contraintes de synchronisation, critère choisi car il décrit une spécificité forte de notre problème et des problèmes de tournées de véhicules en général. En effet, il ajoute un lien entre les tournées réalisées par des ressources différentes.

1.1 Type de ressource

La première partition des modèles de la littérature est réalisée suivant le nombre de types de ressources considérés. Nous abordons d'abord les modèles qui considèrent un type de ressource, très souvent les infirmiers. La seconde partie concerne les modèles qui intègrent plusieurs types de ressource (médecins, infirmiers, aides-soignants, kinésithérapeutes, ...), appelés multi-ressource. Par opposition, les modèles avec un type de ressource sont appelés mono-ressource.

Nous souhaitons préciser un point par rapport à cela. Dans la littérature, des modèles considèrent des types de ressources et d'autres modèles des niveaux de qualification. Ces deux approches sont assez similaires, cependant un point les différencie.

- niveau de qualification : chaque ressource a un niveau de qualification et chaque activité un niveau de qualification attendu minimum. Une ressource peut réaliser une activité si son niveau de qualification est supérieur ou égal au niveau de qualification attendu de l'activité. Dans ce cas, une ressource « sur-qualifiée » peut réaliser une activité.
- type de ressource : chaque ressource a un type et chaque activité un ou plusieurs types requis. Une ressource peut réaliser une activité uniquement si elle a le type requis.

Le niveau de qualification définit donc un seuil minimum nécessaire pour réaliser une activité tandis que le type de ressource restreint la réalisation d'une activité à un type de ressource nécessaire.

1.2 Activités synchronisées

Le second niveau de la classification est réalisé suivant la prise en compte d'activités synchronisées ou non. Nous commençons par décrire les types de synchronisation en sortant du cadre du maintien à domicile, puis nous ferons un focus sur le type de synchronisation dans le cadre du problème qui nous occupe dans ce mémoire.

1.2.1 Les contraintes de synchronisation dans les problèmes de tournée de véhicules

Drexler (2012) a proposé un état de l'art sur les contraintes de synchronisation dans les problèmes de tournées de véhicules. L'auteur précise la spécificité de ce type de contrainte. En effet, sans synchronisation, chaque tournée est indépendante des autres tournées, ainsi une modification portant sur une tournée n'aura pas d'impact sur les autres. En revanche, lors de l'ajout de contraintes de synchronisation, les tournées deviennent dépendantes les unes des autres. Ainsi la modification d'une tournée a un impact sur les autres et peut même les rendre non réalisables.

Il ressort cinq types de synchronisation :

1. synchronisation de tâches

Une tâche est réalisée dans une ville par un ou plusieurs véhicules. Une tâche correspond à un service, un chargement ou un déchargement par exemple. La synchronisation intervient lorsque des tâches peuvent ou doivent être réalisées par exactement plusieurs véhicules appropriés dans une ville donnée ;

2. synchronisation d'opérations

Une opération est une activité réalisée par un véhicule dans une ville. La synchronisation d'opérations intervient lorsque celles-ci doivent être réalisées simultanément dans une ou plusieurs villes par des véhicules différents ;

3. synchronisation de mouvements

Elle concerne les véhicules qui ne sont pas autonomes pour se déplacer. Ils nécessitent donc un ou plusieurs véhicules autonomes pour se déplacer. Par exemple, une remorque (véhicule non autonome) a besoin d'un tracteur (véhicule autonome) pour se déplacer. Les mouvements des véhicules doivent donc être synchronisés tant dans la dimension spatiale que temporelle.

4. synchronisation des chargements

Ce problème considère une demande dans chaque ville qui peut être satisfaite par plusieurs véhicules. Après le passage de tous les véhicules, la quantité restante doit être égale à la demande. En effet, la différence entre la somme des produits déchargés par chaque véhicule passant dans une ville et la somme des produits chargés dans cette même ville doit être égale à la demande associée à cette ville.

5. synchronisation des ressources

Ce type de synchronisation impose la présence d'une ou plusieurs ressources critiques pour effectuer le transfert de charge depuis un véhicule vers un autre véhicule. Dans ce cas, la consommation des ressources critiques sur l'ensemble des véhicules passant dans cette ville doit être inférieure ou égale à la capacité des ressources critiques.

1.2.2 Les contraintes de synchronisation dans les problèmes de maintien à domicile

Dans le cadre du maintien à domicile, le type de synchronisation qui intervient est la synchronisation de tâches, la première dans la classification présentée. Une activité synchronisée nécessite la présence de plusieurs ressources au même moment au domicile du patient. Dans la littérature, nous avons rencontré deux façons de modéliser une activité synchronisée :

- une activité qui nécessite deux ressources. C'est le choix fait dans le papiers de (Ben Bachouch et al. 2008).
- deux activités au domicile du même patient qui doivent être réalisées au même moment. Chaque activité est alors réalisée par une ressource. Dans ce cas, les auteurs introduisent un délai entre la réalisation des deux activités qui modélise une précédence entre les activités. Lorsque le délai est nul, les activités sont synchronisées. Cette modélisation est utilisée dans les travaux suivants : (Thomsen 2006), (Eveborn et al. 2006), (Bredström et Rönnqvist 2008), (Kergosien et al. 2009), (Rasmussen et al. 2012) et (Redjem et al. 2012).

Nous présentons plus en détail les travaux référencés ici, ainsi que plusieurs autres dans la section suivante.

2 Notation

La notation que nous proposons est construite selon trois champs par analogie avec la notation de Graham et al. (1979) pour les problèmes d'ordonnancement. Le premier champ, noté α , décrit la structure prise en compte, c'est-à-dire les caractéristiques des patients et des ressources. Le second champ, noté β , décrit les règles de gestion qui régissent le modèle, c'est-à-dire les règles qui font l'interaction entre les patients et les ressources. Enfin le troisième champ, noté γ , décrit les critères de performance choisis par les différents auteurs.

2.1 Champ α : Structure

- **mono ou multi-période** ($1P$ ou MP) : la plupart des modèles travaillent sur un horizon d'une période ($1P$), cependant certains organisent les tournées de soins sur plusieurs périodes (MP) d'un même jour voire plusieurs jours ;
- **disponibilité des patients** ($Disp_P$) : le patient n'est disponible qu'à certains moments de la journée ;
- **niveau de dépendance** (Dep_P) : chaque patient est caractérisé par un niveau de dépendance ;
- **disponibilité des ressources** ($Disp_R$) : les ressources sont soumises à des plannings de travail ;
- **nombre de types de ressource** (Tr_x) : x prend la valeur 1 lorsqu'un seul type de ressource est considéré, généralement les infirmiers, et prend la valeur n lorsque plusieurs types de ressources sont considérés (médecin, infirmier, aide-soignant, kinésithérapeute, ...);
- **qualification** ($Qualif_R$) : chaque ressource possède un niveau de qualification et elle peut réaliser les activités au domicile des patients compatibles avec ce niveau ;
- **pause déjeuner** ($Break_R$) : l'organisation des activités de chaque ressource intègre une pause pendant la période de disponibilité de la ressource.

Nous avons étudié vingt articles de la littérature dont les caractéristiques sont synthétisées dans le tableau 2.1. Nous constatons que les problèmes traités sont majoritairement mono-période avec un seul

	Péri- ode	Patient		Ressource			
		$Disp_P$	Dep_P	Tr_x	$Disp_R$	$Qualif_R$	$Break_R$
(Begur et al. 1997)	1P			n	X		
(Cheng et Rich 1998)	1P	X		1	X	X	X
(De Angelis 1998)	MP		X	1			
(Bertels et Fahle 2006)	1P	X		1	X	X	
(Borsani et al. 2006)	1P	X		n			
(Thomsen 2006)	1P	X		1			X
(Eveborn et al. 2006)	1P	X		1		X	X
(Akjiratikarl et al. 2007)	1P	X		1	X		
(Bredström et Rönqvist 2008)	1P	X		1			
(Ben Bachouch et al. 2008)	1P	X		1	X	X	X
(Kergosien et al. 2009)	1P	X		n	X		
(Trautsamwieser et Hirsch 2011)	1P	X		1	X	X	X
(Rasmussen et al. 2012)	1P	X		1	X	X	
(Redjem et al. 2012)	1P	X		1			
(Gourc et al. 2013)	MP	X		1	X	X	
(Morito et al. 2014)	1P	X		1	X		
(Fikar et Hirsch 2014)	1P	X		1	X	X	X
(Cattafi et al. 2012)	MP			1	X		
(Riazi et al. 2014)	1P	X		1	X	X	
(Trautsamwieser et Hirsch 2014)	MP	X		1	X	X	X

Tableau 2.1 – Champ α - structure

type de ressource. Cependant neuf papiers intègrent des niveaux de qualifications qui permettent de spécialiser les ressources d'un même type pour la réalisation d'activités de soins plutôt que d'autres. La disponibilité des patients est considérée dans la quasi totalité des papiers. En revanche la caractérisation du niveau de dépendance des patients n'est prise en compte que dans un seul papier (De Angelis (1998)). La prise en compte du niveau de dépendance des patients est une perspective de recherche identifiée par Gourc et al. (2013).

2.2 Champ β : Règles de gestion

- **préférence des patients en matière de ressources** ($Pref_P$) : les patients définissent des priorités entre les ressources qui peuvent effectuer leurs soins ;
- **préférence des ressources en matière de patients** ($Pref_R$) : les ressources définissent les patients dont elles souhaitent ou ne souhaitent pas s'occuper ;
- **ressource régulière** (Reg_R) : si un patient reçoit plusieurs soins à différents moments de la période, il faut favoriser le fait que ce soit toujours la même ressource qui les réalise ;
- **mode de transport** ($TspM$) : plusieurs moyens de transport sont disponibles pour réaliser les tournées de soins comme les transports en commun, le vélo, la voiture, ... ;
- **nombre d'activités par ressource** ($\#_{Act}$) : une tournée a un nombre minimum et maximum d'activités ;
- **précédence entre activités** ($Prec$) : les soins réalisés chez un patient nécessitent d'être réalisés dans un ordre défini ;
- **synchronisation** ($Sync$) : un ou plusieurs soins nécessitent au moins deux ressources pour être réalisés chez un patient ;

- **distance maximale entre deux activités** ($Dist_{Max}$) : la distance entre deux activités successives d'une même tournée est bornée.

	$Pref_P$	$Pref_R$	Reg_R	$TspM$	$\#_{Act}$	$Prec$	$Sync$	$Dist_{max}$
(Begur et al. 1997)								
(Cheng et Rich 1998)								
(De Angelis 1998)								
(Bertels et Fahle 2006)	X	X	X	X				
(Borsani et al. 2006)			X					
(Thomsen 2006)			X				X	
(Eveborn et al. 2006)	X		X			X	X	
(Akjiratikarl et al. 2007)								
(Bredström et Rönnqvist 2008)	X					X	X	
(Ben Bachouch et al. 2008)	X						X	X
(Kergosien et al. 2009)			X			X	X	
(Trautsamwieser et Hirsch 2011)	X	X						
(Rasmussen et al. 2012)				X		X	X	
(Redjem et al. 2012)							X	
(Gourc et al. 2013)			X			X		
(Morito et al. 2014)	X			X	X			X
(Fikar et Hirsch 2014)				X				
(Cattaï et al. 2012)			X					
(Riazi et al. 2014)								
(Trautsamwieser et Hirsch 2014)	X	X						

Tableau 2.2 – Champ β - règles de gestion

Le tableau 2.2 résume les différentes règles de gestion des modèles de la littérature que nous avons étudiés. La caractéristique la plus présente est la ressource régulière. Dans quatre cas sur sept, la présence de la précédence entre activités est un moyen de gérer la synchronisation entre activités. Cela s'explique par la modélisation de la synchronisation de deux activités comme de la précédence avec un délai nul (cf. 1.2.2).

2.3 Champ γ : Critères de performance

- **coût de transport** (C_T) : durée (ou distance) de transport effectuée par les ressources ;
- **coût des heures supplémentaires** (C_{wk}) : surcoût engendré par le dépassement des plannings de travail des ressources ;
- **nombre de visites** (Nb_{max}) : il faut rencontrer le plus de patients possibles parmi un ensemble de patients à soigner pendant une période de temps définie ;
- **équilibre** ($Balance$) : charge de travail équivalente entre les tournées de chaque ressource. Le critère à équilibrer diffère d'un papier à l'autre : nombre d'activités, durées totales des activités réalisées par chaque ressource. Ce critère sera précisé entre parenthèses ;
- **temps d'attente** (\sum_{WT}) : attente des ressources avant le début des soins ;
- **somme des dates de début des activités** (\sum_{SD}) : réalisation des activités au plus tôt ;
- **satisfaction** ($Satis$) : satisfaire au mieux les préférences exprimées par les patients et/ou les ressources.

	C_T	C_{wk}	Nb_{max}	$Balance$	\sum_{WT}	\sum_{SD}	$Satis$
(Begur et al. 1997)	X						
(Cheng et Rich 1998)		X					
(De Angelis 1998)			X				
(Bertels et Fahle 2006)	X						
(Borsani et al. 2006)				durée tournée			
(Thomsen 2006)	X						X
(Eveborn et al. 2006)	X						
(Akjiratikarl et al. 2007)	X						
(Ben Bachouch et al. 2008)	X						
(Bredström et Rönnqvist 2008)	X						
				durée tournée			
							X
	X						X
(Kergosien et al. 2009)	X						
(Trautsamwieser et Hirsch 2011)	X						X
(Rasmussen et al. 2012)	X		X				X
(Redjem et al. 2012)	X				X		
						X	
(Gourc et al. 2013)	X		X	durée tournée			X
(Morito et al. 2014)	X						
(Fikar et Hirsch 2014)	X						X
(Cattafi et al. 2012)	X						
(Riazi et al. 2014)	X						
(Trautsamwieser et Hirsch 2014)		X					

Tableau 2.3 – Champ γ - critères de performance

Le tableau 2.3 résume les critères pris en compte dans les différents modèles de la littérature étudiés. La quasi totalité des papiers intègre les coûts de transport. Lorsque plusieurs critères sont considérés, les auteurs proposent une approche multi-critères avec une somme pondérée des critères. Les pondérations permettent de hiérarchiser les critères (par exemple dans les travaux de (Rasmussen et al. 2012) ou (Gourc et al. 2013)) ou de les considérer avec la même importance (Bredström et Rönnqvist (2008)). Dans ce dernier cas, trois critères sont pris en compte. Nous avons fait apparaître quatre lignes dans le tableau car, dans la résolution, soit chaque critère est pris indépendamment des autres (trois premières lignes) et soit les auteurs proposent également une résolution bi-objectif en tenant compte des critères C_T et $Satis$. De la même manière, Redjem et al. (2012) considère trois critères, traite un problème mono-objectif (\sum_{SD}) et un problème bi-objectif (C_T et \sum_{WT}). Enfin, les travaux de trois auteurs prennent en compte l'équilibrage des tournées suivant la durée des tournées.

II Revue de la littérature

Suite à la présentation de la classification dans la section précédente, l'état de l'art est articulé suivant les deux critères choisis : mono ou multi-ressource et présence ou non d'activités synchronisées. Cette section se termine par une synthèse des méthodes utilisées dans la littérature ainsi que le positionnement du problème que nous traitons dans ce mémoire.

1 Présentation des modèles mono-type

Dans cette partie nous abordons les modèles de la littérature qui ne prennent pas en compte les types de ressources. Dans la majorité des cas, ce sont des infirmiers qui réalisent les soins au domicile des patients.

1.1 Modèles sans contraintes de synchronisation

1.1.1 De Angelis (1998)

Pour commencer, le problème traité par De Angelis (1998) est un problème d'affectation de personnel soignant à des patients. Il consiste à relier des patients à un membre du personnel soignant d'un service de HAD dans le cadre d'un suivi de patients atteints du SIDA dans la ville de Rome en Italie. Le service est composé de médecins, d'infirmiers et d'assistants sociaux. Dans le modèle proposé, l'auteur ne fait pas de distinction entre les médecins et les infirmiers. Les patients sont définis par une classe de dépendance comprise entre 1 et 5. Un patient de niveau 1 est autonome, un patient de niveau 2 peut quitter son logement seul alors qu'un patient de niveau 3 doit être accompagné. Enfin, un patient de niveau 4 ne peut pas quitter son domicile et un patient de niveau 5 reste au lit en permanence. L'objectif du modèle est de proposer une affectation des personnels soignants aux patients sur un horizon de 12 semaines en maximisant le nombre de patients pouvant être admis dans le service de soins à domicile. Une pondération est affectée suivant la classe de dépendance du patient afin de privilégier les patients les plus dépendants. L'auteur ne propose pas à proprement parlé un modèle de construction de tournées pour une structure de soins à domicile mais plutôt un problème de partitionnement. Cependant, c'est un des premiers modèles pour la résolution d'un problème lié aux soins à domicile.

1.1.2 Cheng et Rich (1998)

$1P, Disp_P, Tr_1, Disp_R, Qualif_R, Break_R \mid C_{wk}$

Cheng et Rich (1998) proposent un modèle linéaire en variables mixtes et une méthode approchée pour l'élaboration de tournées des infirmiers d'une structure de soins à domicile. Chaque patient a une fenêtre de temps de disponibilité pendant laquelle il peut recevoir les soins. Les soins sont réalisés par des infirmiers qui sont soumis à des plannings de travail et ont une pause repas par jour. Chaque infirmier a un ensemble de compétences qui lui permet de réaliser certains soins et pas d'autres. Les infirmiers sont disponibles à temps plein ou à temps partiel. Les infirmiers à temps plein sont des travailleurs salariés qui sont payés pour un nombre d'heures défini (durée de travail standard). Ils perçoivent un salaire complémentaire lorsqu'ils dépassent ce nombre d'heures. Cependant, le nombre d'heures travaillées est plafonné par la durée maximale de travail d'un infirmier. Les infirmiers à temps partiel sont rétribués proportionnellement au nombre d'heures travaillées. L'objectif du modèle est de construire les tournées des infirmiers en minimisant le coût total.

Les données du modèle sont les suivantes :

F	ensemble des infirmiers à temps plein
H	ensemble des infirmiers à temps partiel
$N = F \cup H$,	ensemble des infirmiers disponibles, $F \cap H = \emptyset$
P	ensemble des patients plus un patient fictif pour chaque infirmier
$DP(n)$	patient fictif de l'infirmier $n \in N$
L	ensemble des pauses repas
$L(n)$	pause repas de l'infirmier n
$[a_i, b_i]$	date de début au plus tôt et au plus tard des soins réalisés chez le patient $i \in P$

A	ensemble des arcs réalisables
SL	durée de travail standard
MSL	durée maximale de travail d'un infirmier
d_i	temps passé au nœud $i \in P$
t_{ij}	somme de la durée de service au nœud i et de la durée de transport du nœud i vers le nœud j tel que l'arc $(i, j) \in A$
$\delta(i), \rho(i)$	prédécesseurs et successeurs du nœud $i \in N \cup P \cup L$

L'ensemble B_n est défini comme l'ensemble des nœuds qui peuvent être visités par l'infirmier n .

$B_n = \{j \in P \cup N \cup L \text{ tel que l'infirmier } n \text{ peut visiter le nœud } j\}$

Le problème est modélisé par un graphe, les nœuds représentent les patients, les infirmiers et les pauses repas. Il existe un arc entre chaque infirmier et chaque autre nœud. Cependant tous les arcs ne sont pas réalisables. Les auteurs introduisent des patients fictifs dans l'ensemble des patients à soigner. Chaque infirmier a un patient fictif associé. Une tournée est un chemin dans le graphe composé d'un infirmier, un patient fictif, une pause repas et des patients. L'ensemble A est l'ensemble des arcs réalisables, c'est-à-dire l'ensemble des arcs qui relient les infirmiers à des nœuds qu'ils peuvent visiter comme par exemple des patients qu'ils ont la compétence de soigner. Les éléments de l'ensemble A sont de la forme suivante :

1. (n, p) et (p, n) où $n \in N$, $p \in P$ et $p \in B_n$
2. $(n, L(n))$ et $(L(n), n)$ où $n \in N$,
3. (p_1, p_2) et (p_2, p_1) où $p_1 \in P$, $p_2 \in P$ et $p_1 \neq p_2$,
4. $(p, L(n))$ et $(L(n), p)$ où $n \in N$, $p \in P$ et $p \in B_n$

Le point 1 désigne les arcs qui relient les infirmiers aux patients et les patients aux infirmiers lorsque l'infirmier a la compétence pour soigner le patient. Le point 2 désigne les arcs entre chaque infirmier et le nœud représentant sa pause repas ainsi que l'arc entre la pause repas et l'infirmier. Le point 3 représente les arcs entre les patients. Ils modélisent le trajet entre deux patients. Le point 4 représente les arcs qui relient les pauses des infirmiers aux patients et les patients aux pauses des infirmiers lorsque les infirmiers concernés par la pause ont la compétence pour soigner les patients. Le graphe ne doit pas contenir ni de cycle, ni d'arc entre deux infirmiers, ni d'arc entre deux pauses repas.

Les variables sont les suivantes :

- $x_{ij} = 1$ si un infirmier parcourt l'arc (i, j) , $\forall i, j \in A$, 0 sinon
- y_i date de début au nœud $i \in P \cup N \cup L$
- z_n date de fin de travail de l'infirmier $n \in N$
- s_n heures supplémentaires pour un infirmier à temps plein $n \in F$

Les auteurs utilisent également des variables π_j^n pour assurer que les infirmiers ne visitent pas des nœuds interdits où $n \in N$ et $j \in P \cup N \cup L$.

La fonction objectif est de la forme :

$$\min \sum_{n \in F} (z_n - y_n + s_n - d_{L(n)} - SL) + \sum_{n \in H} (z_n - y_n) \quad (2.1)$$

sous les contraintes :

$$x_{ik} - x_{ki} = 0 \quad \forall i \in P, \forall k = L \quad (2.2)$$

$$x(\delta(L(n))) = x(\rho(L(n))) = 1 \quad \forall n \in F \quad (2.3)$$

$$x(\delta(L(n))) = x(\rho(L(n))) = (1 - x_{DP(n),n}) \quad \forall n \in H \quad (2.4)$$

$$x(\delta(i)) - \sum_{k \in L} x_{ik} = x(\rho(i)) - \sum_{k \in L} x_{iv} = 1 \quad \forall i \in N \cup P \quad (2.5)$$

$$y_i + t_{ij} - y_j \leq (b_i + t_{ij} - a_j) \cdot (1 - x_{ij}) \quad \forall i \in N \cup P, \forall j \in P, i \neq j \quad (2.6)$$

$$d_{L(n)} \cdot x_{L(n),n} + y_i + t_{in} - z_n \leq (d_{L(n)} + b_i + t_{in} - a_n) \cdot (1 - x_{in}) \quad \forall i \in P, \forall n \in N \quad (2.7)$$

$$y_j + d_j - y_i \leq (b_j + d_j - a_i) \cdot (1 - x_{ij}) \quad \forall i \in P, \forall j \in L \quad (2.8)$$

$$y_{L(n)} + d_{L(n)} - z_n \leq (b_{L(n)} + d_{L(n)} - a_n) \cdot (1 - x_{nL(n)}) \quad \forall n \in N \quad (2.9)$$

$$y_i + t_{ij} - y_k \leq (b_i + t_{ij} - \frac{1}{2}a_k) \cdot (2 - x_{ij} - x_{jk}) \quad \forall i \in N \cup P, \quad (2.10)$$

$$y_i + t_{in} - y_{L(n)} \leq (b_i + t_{in} - \frac{1}{2}a_{L(n)}) \cdot (2 - x_{in} - x_{nL(n)}) \quad \forall i \in P, \forall n \in N \quad (2.11)$$

$$y_n + d_{L(n)} - z_n \leq 0 \quad \forall n \in F \quad (2.12)$$

$$y_n - z_n \leq 0 \quad \forall n \in H \quad (2.13)$$

$$z_n - y_n + s_n - d_{L(n)} - SL \geq 0, s_n \geq 0 \quad \forall n \in F \quad (2.14)$$

$$z_n - y_n \leq MS L \quad \forall n \in N \quad (2.15)$$

$$\pi_j^n - \pi_i^n \leq 1 - x_{ij} \quad \forall (i, j) \in A^2, \forall n \in N \quad (2.16)$$

$$\pi_j^n - \pi_n^n \geq 1 \quad \forall n \in N \quad (2.17)$$

$$\forall j \in (P \cup N \cup L) \setminus B_n$$

$$x_{nDP(n)} = 1 \quad \forall n \in N \quad (2.18)$$

$$a_n \leq y_n, z_n \leq b_n \quad \forall n \in N \quad (2.19)$$

$$a_i \leq y_i \leq b_i \quad \forall i \in P \cup L \quad (2.20)$$

$$x_e \in \{0, 1\} \quad \forall e \in A \quad (2.21)$$

La fonction (2.1) décrit l'objectif comme la minimisation de la somme des coûts (heures supplémentaires des infirmiers salariés et nombre d'heures travaillées des infirmiers à temps partiel). Les contraintes (2.2) à (2.5) et (2.21) vérifient qu'une solution réalisable ne contient que les types de chemin suivant :

- des chemins qui contiennent exactement une pause repas et une visite qui n'est pas une pause repas,
- des chemins qui contiennent au minimum deux nœuds qui ne sont pas des pauses repas.

Les contraintes (2.18) imposent que les infirmiers débutent leur tournée par le patient fictif. Ainsi il est simple de vérifier si un infirmier a une tournée à réaliser en regardant la valeur de l'arc entre l'infirmier et le patient fictif associé. Les contraintes (2.6) à (2.12) et (2.19) à (2.21) vérifient que les contraintes de fenêtres de temps et de construction de chemins sont respectées. Les contraintes (2.13) vérifient que les infirmiers terminent leur tournée pendant leurs horaires de travail. Les contraintes (2.14) permettent de déterminer le nombre d'heures supplémentaires réalisées par les infirmiers à temps plein. Les contraintes (2.15) vérifient le respect du nombre d'heures maximum à effectuer par les infirmiers à temps plein. Les contraintes (2.16) et (2.17) sont des contraintes de plus court chemin nécessaires pour construire des tournées qui contiennent un infirmier, une pause repas et des patients compatibles avec l'infirmier.

L'ordre de grandeur du nombre de contraintes du modèle est $O(np^2)$ et du nombre de variables est $O(p^2)$ où $n = |N|$ et $p = |P|$. Les auteurs proposent également une formulation à trois indices. Dans ce cas, l'ordre de grandeur du nombre de contraintes est le même, en revanche celui du nombre de variables est plus important lorsque $n > 1$, $O(np^2)$.

Pour résoudre ce problème, les auteurs ont également proposé une méthode en deux phases. La première phase consiste à générer un ensemble de tournées pour chaque infirmier à l'aide d'un algorithme glouton. Les patients sont affectés sans respect des fenêtres de disponibilité en fin de tournée de certains infirmiers suivant une liste ordonnée. Lorsqu'une visite chez un patient débute après la date de début au plus tôt, la visite du patient n'est pas planifiée et est affectée à un infirmier à temps partiel. Ensuite les différentes tournées sont comparées pour conserver la meilleure. Pour déterminer le meilleur ensemble de tournées, les critères sont les suivants :

1. le nombre de patients non affectés,
2. le nombre d'heures supplémentaires.

La seconde phase est une recherche locale afin de diminuer les heures supplémentaires et les heures réalisées par les infirmiers à temps partiel. Les solutions sont perturbées en appliquant un voisinage de type insertion.

La méthode est dans un premier temps testée sur 40 instances générées aléatoirement composées de dix patients et quatre infirmiers (deux à temps plein et deux à temps partiel). Pour ces instances, les résultats sont comparés avec les résultats obtenus avec CPLEX. Les temps de calcul de l'heuristique sont inférieurs à une seconde alors que CPLEX demande 56 à 1966 secondes pour trouver une solution optimale suivant les instances. Pour 17 instances, l'heuristique trouve une solution optimale, pour les autres le gap est compris entre 1,1% et 21%. Les auteurs testent également des instances de taille plus importante composées de 30 infirmiers et 96 patients, 229 infirmiers et 900 patients, 294 infirmiers et 900 patients. Les temps de calcul sont alors plus importants (allant jusqu'à 100 secondes). CPLEX ne donne pas de solutions sur ces tailles d'instance donc il n'est pas possible de comparer les résultats. Cependant, les auteurs précisent que tous les patients reçoivent les soins prévus sauf pour l'instance à 229 infirmiers où 6 patients ne reçoivent pas les soins prévus.

1.1.3 Bertels et Fahle (2006)

$1P, Disp_P, Tr_1, Disp_R, Qualif_R | Pref_P, Pref_R, Reg_R, TspM | C_T$

Selon Bertels et Fahle (2006), la difficulté du problème d'organisation des soins à domicile réside dans la combinaison des aspects de tournées de véhicules et de planification de personnel. Selon les auteurs, il est primordial de résoudre conjointement les deux problèmes pour obtenir des solutions applicables.

Les auteurs considèrent un ensemble d'infirmiers où chacun est caractérisé par un ensemble de compétences. Une tâche modélise une activité (formation, pause, ...) ou des soins prodigués à des patients. Les tâches doivent être réalisées pendant les périodes de disponibilité des infirmiers. Elles sont réalisées dans un lieu défini et nécessitent une compétence. Le modèle intègre deux types de fenêtre de temps, des contraintes dures et molles. Les contraintes molles indiquent des préférences, les contraintes dures des dates de début et de fin à respecter scrupuleusement. Un planning du personnel qui ne respecte pas les fenêtres de temps de disponibilité des infirmiers sera considéré comme irréalisable. Enfin les auteurs modélisent la préférence d'un patient pour certains infirmiers ou la préférence d'un infirmier pour certains patients et enfin la préférence d'un infirmier pour certaines tâches. Cet aspect est considéré comme une contrainte molle. Les données utilisées dans le modèle sont les suivantes :

N	ensemble des infirmiers
P	ensemble des patients
J	ensemble des tâches à réaliser
S	ensemble des compétences
$[hb_J, he_J]$	date de début au plus tôt et au plus tard pour débiter une tâche, contrainte dure
$[sb_J, se_J]$	date de début au plus tôt et au plus tard pour débiter une tâche, contrainte molle
d_J	durée d'une tâche
$[hb_N, he_N]$	période de disponibilité d'un infirmier, contrainte dure
$[sb_N, se_N]$	période de disponibilité d'un infirmier, contrainte molle
$[min_n, max_n]$	temps de travail minimum et maximum de l'infirmier $n \in N$
$quali_j$	ensemble des compétences requises pour réaliser la tâche $j \in J$
$quali_n$	ensemble des compétences possédées par l'infirmier $n \in N$

tr_time_{ij} temps de transport entre les tâches $i \in J$ et $j \in J$

La fonction $sc : N \times J \rightarrow [0, 1]$ modélise les pénalités liées aux contraintes molles (préférences des infirmiers et des patients, période de disponibilité des patients). Une séquence $R^{(n)} = [(j_1, t_1), \dots, (j_k, t_k)]$, $j_l \in J, t_l \in \mathbb{R}, l = 1, \dots, k, n \in N$ définit l'emploi du temps de l'infirmier n . t_l est la date de début de la tâches $j_l, l \in \{1, \dots, k\}$. Une solution S sera donc de la forme suivant : $S = \{R^{(1)}, \dots, R^{(N)}\}$.

La fonction objectif est une minimisation de la fonction coût qui est la somme pondérée des temps de transport et des pénalités liées aux contraintes du problème de planification du personnel. Les pénalités sont calculées à l'aide des équations (2.22) à (2.27). Les équations (2.22) à (2.24) permettent de calculer les pénalités liées à la violation des contraintes molles sur les fenêtres de temps de disponibilité des patients.

$$early_J(j) = \begin{cases} 0 & si \ sb_J(j) = hb_J(j) \\ \frac{sb_J(j) - t_j}{sb_J(j) - hb_J(j)} & sinon \end{cases} \quad \forall j \in J \quad (2.22)$$

$$late_J(j) = \begin{cases} 0 & si \ he_J(j) = se_J(j) \\ \frac{t_j - se_J(j)}{he_J(j) - se_J(j)} & sinon \end{cases} \quad \forall j \in J \quad (2.23)$$

$$P_J(j) = \max\{early_J(j), late_J(j), 0\}, \quad \forall j \in J, \quad (2.24)$$

Les équations (2.25) à (2.27) permettent de calculer les pénalités liées à la violation des contraintes molles de disponibilité des infirmiers au début et à la fin de leur période de disponibilité. k_n est la dernière tâche affectée à l'infirmier $n \in N$.

$$early_N(n) = \begin{cases} 0 & si \ sb_N(n) = hb_N(n) \\ \frac{sb_N(n) - t_1}{sb_N(n) - hb_N(n)} & sinon \end{cases} \quad \forall n \in N \quad (2.25)$$

$$late_N(n) = \begin{cases} 0 & si \ he_N(n) = se_N(n) \\ \frac{t_{k_n} + d_J(j_{k_n}) - se_N(n)}{he_N(n) - se_N(n)} & sinon \end{cases} \quad \forall n \in N \quad (2.26)$$

$$P_N(n) = \frac{1}{2} (\max\{early_N(n), 0\} + \max\{late_N(n), 0\}) \quad \forall n \in N \quad (2.27)$$

Enfin les équations (2.28) évaluent les pénalités en rapport avec le non respect des contraintes molles liées aux préférences des patients. Ces pénalités sont normalisées par le nombre de tâches affectées à chaque infirmier.

$$P_{sc}(n) = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k sc(n, j_l), \quad \forall n \in N \quad (2.28)$$

La fonction coût est la somme pondérée des coûts et des pénalités :

$$\begin{aligned} obj(R^{(1)}, \dots, R^{(N)}) = & \alpha_1 \frac{\sum_{i=1}^{|N|} \sum_{l=1}^{k_i-1} tr_time_{j_l^{(i)} j_{l+1}^{(i)}} - LB_{traveltime}}{UB_{traveltime} - LB_{traveltime} + \epsilon} \\ & + \alpha_2 \frac{1}{|N|} \frac{\sum_{n=1}^{|N|} [t_{k_n}^{(n)} + d_j + d_j(j_{k_n}^{(n)}) - t_1^{(n)}] - LB_{worktime}}{UB_{worktime} - LB_{worktime} + \epsilon} \\ & + \alpha_3 \frac{1}{|J|} \sum_{j=1}^{|J|} P_J(j) + \alpha_4 \frac{1}{|N|} \sum_{n=1}^{|N|} P_N(n) + \alpha_5 \frac{1}{|N|} P_{sc}(n) \end{aligned}$$

avec

$$\sum_{i=1}^5 \alpha_i = 1$$

Le premier terme de la somme correspond à la somme des temps de trajet nécessaire entre deux tâches successives normalisée par rapport à la différence entre une borne supérieure ($UB_{traveltime}$) et une borne inférieure ($LB_{traveltime}$) du temps de transport. De la même manière, le second terme de la somme modélise le temps de travail total des infirmiers normalisée par rapport à la différence entre la borne supérieure ($UB_{worktime}$) et la borne inférieure ($LB_{worktime}$) du temps de travail des infirmiers. Les auteurs déterminent les bornes supérieures et inférieures de la manière suivante :

- $UB_{traveltime}$: somme des $|J| - |N|$ plus grands temps de transport entre deux tâches,
- $LB_{traveltime}$: somme des $|J| - |N|$ plus petits temps de transport entre deux tâches,
- $UB_{worktime}$: somme des $|N|$ plus grandes durées de l'ensemble des tâches,
- $LB_{worktime}$: somme des $|N|$ plus petites durées de l'ensemble des tâches,

Les autres termes de la somme correspondent aux pénalités liées au non respect des fenêtres de temps et de préférence. Ils sont calculés par les fonctions (2.24), (2.27) et (2.28)

La fonction objectif s'écrit alors :

$$\min obj \left(R^{(1)}, ..., R^{(N)} \right) \quad (2.29)$$

sous les contraintes suivantes :

$$\bigcup_{i=1}^{|N|} \bigcup_{l=1}^{k_i} \{j_l^{(i)}\} = J \quad (2.30)$$

$$\left(j_l^{(i)} = j_{l'}^{(i')} \right) \Rightarrow (i = i' \wedge l = l') \quad \forall (i, i') \in N, l \in (1, k_i), l' \in (1, k_{i'}) \quad (2.31)$$

$$t_l^{(i)} \in \left[hb_J \left(j_l^{(i)} \right), he_J \left(j_l^{(i)} \right) \right] \quad \forall i \in N, \forall l \in \{1, ..., k_i\} \quad (2.32)$$

$$t_l^{(i)} + d_J \left(j_l^{(i)} \right) + tr_time \left(j_l^{(i)}, j_{l+1}^{(i)} \right) \leq t_{l+1}^{(i)} \quad \forall i \in N, \forall l \in \{1, ..., k_i - 1\} \quad (2.33)$$

$$min_i \leq t_{k_i}^{(i)} + d_J \left(j_{k_i}^{(i)} \right) - t_1^{(i)} \quad \forall i \in N \quad (2.34)$$

$$max_i \geq t_{k_i}^{(i)} + d_J \left(j_{k_i}^{(i)} \right) - t_1^{(i)} \quad \forall i \in N \quad (2.35)$$

$$hb_N(i) \leq t_1^{(i)} \text{ et } t_{k_i}^{(i)} + d_J \left(j_{k_i}^{(i)} \right) \leq he_N(i) \quad \forall i \in N \quad (2.36)$$

$$quali_J \left(j_l^{(i)} \right) \subseteq quali_N(i) \quad \forall i \in N, \forall l \in \{1, ..., k_i\} \quad (2.37)$$

Les contraintes (2.30) à (2.37) sont les contraintes dures du modèle. Les contraintes (2.30) vérifient que toutes les tâches sont réalisées. Les contraintes (2.31) vérifient que chaque tâche n'a été réalisée qu'une seule fois. Les tâches débutent dans la période définie selon les contraintes (2.32). Les contraintes (2.33) prennent en compte le temps de trajet entre deux tâches successives réalisées par le même infirmier. Les dates de début et de fin du planning de travail des infirmiers sont respectées d'après les contraintes (2.34) et (2.35). Les contraintes (2.36) assurent qu'aucune tâche n'est réalisée en dehors des périodes de travail des infirmiers. Enfin, les contraintes (2.37) vérifient que les tâches sont affectées à des infirmiers qui possèdent les qualifications requises.

Pour réduire les temps de calcul, les auteurs proposent un pré-traitement qui consiste à associer des tâches et des infirmiers compatibles (respect des contraintes (2.36) et (2.37)) et en respectant les précédences entre les tâches suivant les fenêtres de temps.

Les auteurs proposent et comparent différentes méthodes pour résoudre ce problème. La première consiste à résoudre le programme linéaire précédent, les résultats servent de base de comparaison. Les auteurs proposent également différentes combinaisons entre la programmation par contraintes et

des métaheuristiques comme le recuit simulé homogène, présenté par Kirkpatrick et al. (1983) ou la recherche tabou proposée par Glover (1989). Une solution est représentée de la même manière que dans le modèle mathématique : $(R^{(1)}, \dots, R^{(N)})$ où $R^{(i)}$ représente l'emploi du temps de l'infirmier i . Le système de voisinage utilisé dans les métaheuristiques est l'opérateur 1-shift, une tâche est retirée de la liste d'un infirmier puis insérée dans la liste d'un autre infirmier. La solution initiale est déterminée soit par la programmation par contraintes, soit par une heuristique. Cette heuristique consiste à répartir les tâches aux infirmiers puis à trouver une séquence optimale dans chaque partition (à l'aide de programmation linéaire).

Les méthodes sont comparées sur 120 instances, composées de 20 à 50 infirmiers, 80 à 200 patients et 200 à 600 tâches par jour. Les temps de calcul sont limités à 900 secondes. Les auteurs montrent que les deux métaheuristiques donnent de meilleurs résultats si la solution initiale provient de la programmation par contraintes plutôt que de l'heuristique et la recherche tabou permet d'obtenir de meilleurs résultats que le recuit simulé. Ensuite, les auteurs proposent une hybridation entre la programmation par contraintes et chacune des métaheuristiques. Pour ces méthodes, c'est également l'hybridation avec la recherche tabou qui obtient de meilleurs résultats avec un temps moyen de calcul de 15 minutes.

1.1.4 Akjiratikarl et al. (2007)

$1P, Disp_P, Tr_1, Disp_R | C_T$

Akjiratikarl et al. (2007) ont travaillé sur une méthode d'optimisation pour la construction de tournées de soins à domicile. Cet article est le premier à utiliser une méthode approchée à population. En effet, les auteurs proposent une Optimisation par Essaim Particulaire (*Particle Swarm Optimization PSO*) présentée par Kennedy et Eberhart (1995). Cette méthode est inspirée des comportements sociaux des groupes d'animaux comme des oiseaux ou des bancs de poissons. La particularité du problème traité réside dans la prise en compte du domicile des ressources. En effet, chaque ressource débute et termine sa tournée à son domicile. Cela implique donc la construction de tournées avec m dépôts, où m est le nombre de ressources disponibles. Une activité de soins est caractérisée par une fenêtre de temps et un domicile où elle doit être réalisée. Les activités de soins nécessitent une ressource au domicile des patients. Dans la présentation de leur problématique, les auteurs intègrent également la notion de préférence des patients et la compétence des ressources. Cependant, ces deux aspects seront négligés lors de la résolution de problème à l'aide de la PSO. Le critère est la distance totale parcourue par les soignants. Cela revient donc à tester la PSO sur un problème de m-TSPTW (multiple Traveling Salesman Problem with Time Window) en considérant plusieurs dépôts, le domicile de chaque ressource représentant un dépôt. La population initiale est générée :

- de manière aléatoire,
- à l'aide de l'heuristique *ESTPMDA* (Earliest Start Time Priority with Minimum Distance Assignment). Les activités sont triées suivant l'ordre croissant des dates de début au plus tôt. Ensuite, chaque activité est insérée dans la tournée de chaque ressource et le coût de l'insertion dans chaque tournée est calculé. Ainsi, une matrice de priorité est définie, la priorité la plus élevée est donnée à la ressource qui minimise le coût d'insertion. Ensuite, chaque activité est affectée à la ressource la plus prioritaire qui ne viole pas les contraintes de disponibilité des ressources et du patient.

Pour favoriser la convergence rapide de la solution, les auteurs intègrent une recherche locale. Deux systèmes de voisinage sont utilisés lors de la recherche locale :

- un voisinage permutation : deux activités choisies aléatoirement sont échangées entre deux tournées différentes, elles aussi choisies aléatoirement,
- un voisinage insertion : une activité choisie aléatoirement est insérée dans une autre tournée et à une position choisie aléatoirement.

Les tests sont effectués sur une instance réelle qui est composée de 28 visites réparties sur 7 jours. Chaque journée est traitée indépendamment des autres. Les activités durent 30, 45, 60 ou 90 minutes. Les auteurs comparent les résultats obtenus dans quatre configurations :

- 1 la PSO avec l'heuristique *ESTPMDA* pour générer la population initiale,
- 2 la PSO hybridée avec la recherche locale et la population initiale générée aléatoirement,
- 3 la recherche locale avec une solution initiale trouvée avec l'heuristique *ESTPMDA*,
- 4 la PSO hybridée avec la recherche locale et la population initiale déterminée avec l'heuristique *ESTPMDA*.

L'initialisation de la population avec l'heuristique *ESTPMDA* consiste à générer aléatoirement une population de particules et à leurs appliquer l'heuristique. Les auteurs concluent que la configuration 4 donne les résultats les plus intéressants.

1.1.5 Trautsamwieser et Hirsch (2011)

$1P, Disp_P, Tr_1, Disp_R, Qualif_R, Break_R | Pref_P, Pref_R | C_T, Satis$

Trautsamwieser et Hirsch (2011) proposent une modélisation linéaire du problème de construction de tournées de soins à domicile ainsi qu'une métaheuristique pour traiter des instances de taille réelle (jusqu'à 512 activités de soins et 75 infirmiers) sur un horizon d'une journée. Le modèle proposé considère un type de ressource (infirmier). Les infirmiers sont à temps plein ou à temps partiel. Les infirmiers sont soumis à des plannings de travail et peuvent exprimer une préférence pour :

- les patients à soigner,
- le souhait de ne pas soigner un patient,
- des horaires de travail pour les infirmiers à temps partiel.

De plus, chaque infirmier a un niveau de qualification et parle une ou plusieurs langues. De leur côté, les patients peuvent exprimer une préférence pour un infirmier pour leur prodiguer les soins et refuser un infirmier parmi les infirmiers disponibles. Chaque patient est également caractérisé par le niveau de compétence minimum requis pour la réalisation des soins. Les dates de début des activités de soins sont soumises à des contraintes temporelles exprimées par les patients. L'objectif est de minimiser la durée totale des tournées ainsi que la non-satisfaction des patients et des infirmiers. La non-satisfaction est définie suivant les caractéristiques décrites dans ce paragraphe auxquelles s'ajoutent le souhait de minimiser la distance entre le domicile et la première visite de chaque tournée et la distance entre la dernière visite de chaque tournée et le domicile de l'infirmier. En effet, les heures de travail des infirmiers commencent au début de la réalisation du premier soin et se termine à la fin de la réalisation du dernier soin de la tournée. Par conséquent, le premier et le dernier trajets ne sont pas payés. Les auteurs ont résolu de manière optimale le problème avec le solveur Xpress sur de petites instances composées de vingt activités et quatre infirmiers. En revanche, sur les instances réelles, le solveur ne propose pas de solution. Pour cela, Trautsamwieser et Hirsch (2011) utilisent une recherche à voisinages variables (*Variable Neighborhood Search*). Cette métaheuristique, présentée par Mladenović et Hansen (1997), consiste à itérer des recherches locales en perturbant la solution courante avec un voisinage différent. Si la recherche locale améliore la solution record, la recherche locale suivante utilisera un système de voisinage plus petit. Dans le cas contraire, la recherche locale suivante utilisera un système de voisinage plus grand. Les systèmes de voisinage utilisent deux types d'opérateurs :

- un opérateur de mouvement (*move*) : une séquence d'activités de la tournée de l'infirmier i_1 est insérée aléatoirement dans la tournée de l'infirmier i_2 , i_1 et i_2 sont choisis aléatoirement,
- un opérateur d'échange (*cross-exchange*) : une séquence d'activités s_1 de la tournée de l'infirmier i_1 est insérée aléatoirement dans la tournée de l'infirmier i_2 et une séquence d'activités s_2 de la tournée de l'infirmier i_2 est insérée aléatoirement dans la tournée de l'infirmier i_1 .

Les séquences d'activités ainsi que les infirmiers i_1 et i_2 sont choisis aléatoirement. Le nombre d'activités d'une séquence est compris entre 1 et le nombre d'activités qui composent la tournée. Douze systèmes de voisinage permettent de perturber la solution :

- appliquer une à quatre fois l'opérateur de mouvement,
- appliquer une à huit fois l'opérateur d'échange.

Le voisinage utilisé dans la recherche locale est un mouvement 3 – *opt*. Avec cette métaheuristique, les auteurs retrouvent les résultats du solveur sur les petites instances. Ensuite, ils appliquent leur méthode sur trois instances réelles :

- une instance en zone urbaine composée de 512 activités de soins et 75 infirmiers,
- deux instances en zone rurale, 368 activités de soins, 53 infirmiers et 140 activités de soins, 13 infirmiers.

Pour les trois instances, des solutions réalisables sont trouvées, cependant elles ne peuvent être comparées avec des solutions exactes car le solveur ne propose aucune solution.

1.1.6 Trautsamwieser et Hirsch (2014)

$MP, Disp_P, Tr_1, Disp_R, Qualif_R | Pref_P, Pref_R | C_{wk}$

Trautsamwieser et Hirsch (2014) étendent les travaux précédents en intégrant un horizon de plusieurs jours. Les caractéristiques prises en compte sont les mêmes que dans Trautsamwieser et Hirsch (2011). La résolution est basée sur une approche *branch-price-and-cut*. Cette approche consiste à faire une décomposition de Dantzig-Wolfe et ainsi obtenir un problème maître et $(T * V)$ sous-problèmes esclaves où T est l'horizon considéré et V le nombre d'infirmiers. Un sous-problème vise à déterminer une tournée réalisable pour un infirmier pour un jour de l'horizon. Dans le problème maître, les tournées sont combinées pour former le plan de travail sur l'horizon pour chaque infirmier.

1.1.7 Gourc et al. (2013)

$MP, Disp_P, Tr_1, Disp_R, Qualif_R | Reg_R, Prec | C_T, Nb_{max}, Balance(duree), Satis$

Dans ce papier, Gourc et al. (2013) s'intéressent à la planification multi-période des soins et la construction des tournées dans le cadre d'un Service de Soins Infirmiers À Domicile. Les auteurs définissent les informations à prendre en compte relatives aux :

- patients ; période de disponibilité, préférences, adresse, objet de la prise en charge, niveau de dépendance, ...
- ressources : compétences, qualifications, horaire de travail, préférence, ...
- activités de soin : patient concerné, périodicité, qualifications requises, période de disponibilité du patient, temps entre deux soins chez un patient, ...

Cependant, toutes ces informations ne sont pas prises en compte actuellement dans la résolution. Pour obtenir des solutions, les auteurs utilisent une recherche tabou. Les données d'entrée de la méthode sont : la liste des activités de soins à réaliser, une période de réalisation de l'activité, la qualification de la ressource requise, le nombre de tournées à planifier par période. Les critères à optimiser sont :

1. le coût de transport,
2. la somme des retards de début de chaque activité de soins par rapport à la période de disponibilité du patient,
3. la somme des débordement des plannings des ressources,
4. le respect du délai entre deux activités chez le même patient,
5. le taux de remplissage moyen des tournées,
6. l'équilibre des tournées en fonction de la durée.

Les critères 2, 3 et 4 sont prioritaires. Les critères 1, 5 et 6 sont traités ensuite comme une combinaison linéaire. La méthode est testée sur une instance réelle (entre 60 et 80 activités pour 53 patients). La planification est réalisée sur trois périodes d'une même journée :

- matinée : cinq tournées,

- après midi : une tournée,
- soirée : quatre tournées.

La solution initiale est la planification réalisée par l’infirmier coordonnateur. La recherche tabou permet d’améliorer tous les critères de 20% à 50%.

Les auteurs évoquent dans les perspectives l’intégration de l’équilibrage des tournées suivant le niveau de dépendance des patients et la replanification partielle et dynamique des tournées.

1.1.8 Morito et al. (2014)

$1P, Disp_P, Tr_1, Disp_R | Pref_P, TspM, \#_{Act}, Dist_{max} | C_T$

Morito et al. (2014) proposent une approche différente à base de génération de colonnes pour résoudre un problème d’organisation de soins à domicile. Nous retrouvons les caractéristiques des modèles présentés précédemment comme les plannings des ressources, les fenêtres de temps de disponibilité des patients et la préférence des patients. La différence avec les autres papiers est l’intégration de deux modes de transport pour relier les domiciles des patients (voiture et vélo). Le temps de déplacement entre deux domiciles dépend du mode de transport choisi. Il faut préciser que certains patients éloignés ne peuvent être visités qu’en voiture. À cela s’ajoutent des contraintes sur le nombre minimum et maximum de visites par tournée ainsi qu’un temps maximum entre deux visites successives. La méthode est basée sur la résolution d’un problème de partitionnement et la génération de colonnes. Les auteurs testent leur méthode sur cinq instances réelles, chacune correspondant à un jour de la semaine. Le nombre de ressources disponibles varie entre 10 et 12 et le nombre de patients entre 22 et 32. Les auteurs comparent leurs résultats avec les solutions mises en œuvre dans la structure de soins pendant la même période. Les gains observés vont jusqu’à 15% sur la durée totale des tournées.

1.1.9 Fikar et Hirsch (2014)

$1P, Disp_P, Tr_1, Disp_R, Qualif_R, Break_R | TspM | C_T, Satis$

Ces travaux se situent dans un contexte de service à domicile en environnement urbain. Le problème est présenté de la manière suivante : soit un ensemble d’activités à réaliser, chaque activité requiert un niveau de qualification. Pour réaliser les activités, un ensemble d’infirmiers et un ensemble de véhicules sont disponibles. Chaque véhicule est conduit par un chauffeur et fait le lien entre les différents lieux où déposer (point de livraison) et récupérer (point de collecte) les infirmiers. Le conducteur du véhicule ne peut pas réaliser de soins. Le véhicule a une capacité, il peut donc embarquer un nombre fini d’infirmiers (maximum quatre). Chaque infirmier a un niveau de qualification, est soumis à un planning de travail et doit effectuer une pause. Une activité peut être réalisée par un infirmier ayant un niveau de qualification supérieur ou égal au niveau de qualification requis pour l’activité. Pour satisfaire les infirmiers, l’écart entre le niveau de qualification de l’infirmier et le niveau de compétence requis doit être minimal. Un infirmier peut se déplacer à pied entre les domiciles des patients. L’objectif est d’organiser les tournées des véhicules (composées de point de collecte et de points de livraison), chaque point de livraison étant le point de départ d’une tournée pédestre d’un infirmier (à construire également).

À l’inverse des modélisations précédentes basées sur un m-TSPTW, les auteurs proposent une extension du *Dial-A-Ride-Problem (DARP)* et plus particulièrement du *many to many multi-trip DARP*. Le *DARP* a été décrit par Cordeau et Laporte (2003). Ce problème est spécifique au transport porte-à-porte de personnes (appelés utilisateurs). Plusieurs personnes peuvent prendre place dans un véhicule qui est soumis à une contrainte de capacité. Le véhicule débute et termine sa tournée dans un dépôt. Chaque utilisateur spécifie son point de départ et sa destination, ce qui constitue une requête. L’utilisateur peut fixer également l’heure à laquelle il souhaite quitter son point de départ et l’heure à laquelle il souhaite arriver à destination. Ce peut être une heure précise ou une fenêtre de temps.

Toutes les activités doivent débuter entre une date de début au plus tôt et une date de début au plus tard fixées, et ont une durée connue. Le problème définit un graphe où chaque activité définit

un lieu potentiel de livraison et de collecte. Deux dates peuvent être calculées pour chaque nœud : la date d'arrivée d'un infirmier à pied et la date d'arrivée d'un infirmier en voiture. Toutes les tournées débutent et se terminent au dépôt. À chaque arc du graphe sont associés deux temps : celui nécessaire pour parcourir l'arc avec un véhicule et celui nécessaire pour parcourir l'arc à pied. Un véhicule ne peut pas attendre sauf s'il est au dépôt. Cependant pour chaque infirmier, la distance parcourue à pied entre deux domiciles est limitée ainsi que la distance totale parcourue. S'il arrive au domicile d'un patient avant la date de début au plus tôt de l'activité, il devra attendre. Pour proposer des solutions à ce problème, les auteurs proposent une matheuristique en deux étapes :

- la première étape construit un ensemble d'itinéraires réalisables à pied,
 - la seconde étape construit les trajets faits par les véhicules et ordonne les itinéraires faits à pied.
- Cette étape est réalisée avec un algorithme de type savings et une recherche tabou.

Un algorithme de type *savings* appelé également *l'algorithme des économies* proposé par Clarke et Wright (1964) permet la construction de tournées de véhicules. Cet algorithme consiste à créer une tournée vers chacune des n villes au départ du dépôt. Ensuite, $n - 1$ fusions sont réalisées, une fusion consiste à choisir deux tournées et les réunir pour former une nouvelle tournée. Ainsi, on évite un aller-retour vers le dépôt. L'objectif est d'effectuer des fusions qui permettent de diminuer le plus possible la distance totale parcourue. Dans le problème traité, l'heuristique savings permet de construire les tournées des véhicules en associant les itinéraires à pied et la tournée d'un véhicule. La recherche tabou optimise l'ensemble en utilisant deux systèmes de voisinage. Ces systèmes de voisinage font intervenir des véhicules fictifs. Le premier, noté *PDmove*, consiste à choisir un point de livraison, le placer dans un véhicule fictif et le réinsérer dans sa meilleure position. Le second, noté *DPmove*, consiste à choisir un point de collecte, le placer dans un véhicule fictif et le réinsérer dans sa meilleure position. À chaque itération, le voisin qui améliore le plus la solution est choisi et le nœud déplacé est ajouté à la liste tabou.

Les expérimentations sont menées sur un jeu d'instances généré par les auteurs. Trois tailles d'instances sont utilisées : 75, 100 et 125 activités. Chaque véhicule peut accueillir quatre infirmiers en plus du conducteur. Étant donné le périmètre considéré, les auteurs proposent des résultats mais ne peuvent les comparer à d'autres méthodes de la littérature.

1.1.10 Riazi et al. (2014)

$1P, Disp_P, Tr_1, Disp_R, Qualif_R | C_T$

Les travaux de Riazi et al. (2014) expliquent une résolution avec une heuristique, nommée *gossip algorithm*. Cette méthode a été proposée par Franceschelli et al. (2013) pour le m-VRP. Le problème traité intègre des fenêtres de temps sur les ressources (planning de travail) et sur les patients (disponibilité pour recevoir les soins). Les ressources ont un niveau de qualification. L'objectif est de minimiser les temps de transport.

1.1.11 Cattafi et al. (2012)

$MP, Tr_1, Disp_R | Reg_R | C_T$

Pour terminer cette partie de présentation des modèles mono-type sans activité synchronisée, nous pouvons ajouter les travaux de Cattafi et al. (2012). L'originalité réside dans l'approche de résolution. Le problème traité prend en compte moins de caractéristiques que les problèmes présentés précédemment cependant il considère un horizon multi-période. Un ensemble d'infirmiers doit dispenser des soins au domicile des patients qui ne sont pas soumis à des fenêtres de temps de disponibilité. En revanche les infirmiers sont soumis à des contraintes de temps de travail journalier. L'objectif est de construire les tournées tout en optimisant deux critères :

- minimiser les distances parcourues,
- favoriser la régularité de l'infirmier qui prodigue les soins à chaque patient.

Le problème est traité sous l'angle d'un problème de *bin packing* avec la programmation par contraintes. Chaque infirmier est assimilé à une boîte, sa capacité correspond au nombre d'heures disponibles pour réaliser les soins. Les activités de soins ainsi que le transport sont les items à faire entrer dans les boîtes. Les instances correspondent à l'activité du mois de février 2010 dans la ville de Ferrara en Italie. L'équipe est composée de quinze infirmiers. Sur la période 3323 activités de soins ont été réalisées au domicile de 458 patients. Les résultats obtenus sur des instances réelles sont significativement meilleurs que ceux obtenus à la main par l'infirmier en chef responsable de l'organisation des tournées.

1.2 Modèle avec contraintes de synchronisation

1.2.1 Eveborn et al. (2006)

$1P, Disp_P, Tr_1, Qualif_R, Break_R | Pref_P, Reg_R, Prec, Sync | C_T$

Eveborn et al. (2006) proposent un modèle qui intègre de nouvelles caractéristiques comme la régularité des soignants ou la synchronisation et la précédence entre soins. La régularité des soignants consiste à privilégier le même soignant pour réaliser les soins chez un patient. La synchronisation de soins décrit la nécessité que deux soignants soient présents pour réaliser un soin chez un patient. La précédence entre des soins définit un ordre dans lequel les soins d'un patient doivent être réalisés. Ces deux types de contraintes sont considérées comme des contraintes temporelles. En effet, les auteurs intègrent un délai entre deux soins à réaliser chez un même patient. Si le délai est nul entre deux soins, les deux soignants doivent être présents à la même date pour réaliser les soins chez le patient. De plus, chaque membre du personnel soignant est affecté à un secteur et il ne réalise des soins qu'auprès des patients de son secteur. Le modèle intègre les caractéristiques des travaux précédents : fenêtres de temps de disponibilité des patients, compétences, pauses déjeuner. En revanche, les auteurs ne fixent pas de périodes de disponibilité des ressources. L'objectif est de construire les tournées du personnel soignant en minimisant des coûts. Le coût est la somme pondérée de différents facteurs comme : le temps de transport, les coûts de transport, la préférence des patients, le nombre d'heures travaillées, ...

La méthode proposée par les auteurs se décompose en deux étapes. La première se rapporte à un problème de partitionnement, chaque patient est affecté à un soignant en minimisant un coût. Cette étape est appelée *matching problem* et est réalisée de deux façons : une méthode exacte (programmation linéaire) et une méthode heuristique (*repeated assignment*). La seconde étape permet de construire les tournées de chaque soignant.

Les tests sont réalisés sur 4 instances où le nombre de soignants est compris entre 12 et 21 et le nombre de patients entre 86 et 123. Ces instances sont issues de structures de HAD de villes suédoises. Lorsque la première étape est réalisée à l'aide de l'heuristique, les temps de calcul sont plus faibles (de l'ordre de 40%) qu'avec la programmation linéaire. En revanche, les deux méthodes donnent des résultats similaires du point de vue de la fonction objectif.

1.2.2 Thomsen (2006)

$1P, Disp_P, Tr_1, Break_R | Reg_R, Sync | C_T, Satis$

Thomsen (2006) propose un modèle mathématique et différentes méthodes de résolution pour le problème de dispensation de soins à domicile. La fonction objectif du modèle ainsi que certaines contraintes sont quadratiques. Le problème est décrit comme suit : un ensemble de soignants est disponible pour réaliser des visites. L'auteur considère trois catégories de soignants : infirmiers, aides-soignants et sans qualification. Cependant pour la modélisation du problème, l'auteur considère que tous les soins peuvent être réalisés par toutes les ressources. Les soignants sont soumis à une fenêtre de temps de disponibilité. Une visite est réalisée lorsqu'un soignant se rend au domicile d'un patient. Cette visite a une durée ainsi que des dates de début au plus tôt et au plus tard. De plus, l'auteur décrit la notion de *visites partagées* et de *visites bloquées*. Une visite partagée est une visite durant laquelle deux

soignants doivent être présents (contrainte de synchronisation). Cela se produit lorsque le patient doit être déplacé avec un lève-personne par exemple. Elle est modélisée par deux visites qui doivent être réalisées simultanément par deux ressources différentes au domicile d'un patient. Une visite bloquée est une visite qui permet au soignant de retourner au centre et ainsi faire une pause. Chaque soignant doit réaliser au moins une visite bloquée par jour. Un soignant régulier est affecté à chaque patient.

Les données du modèle sont les suivantes :

Z	ensemble des patients
O	ensemble des soignants
V	ensemble des visites à réaliser, $ V = n$
R	ensemble des tournées, $ R = m$
n_r	nombre de visites de la tournée $r \in R$
a_i, b_i	date de début au plus tôt et au plus tard pour débiter la visite $i \in V$
g_r, h_r	date de début et de fin de disponibilité du soignant $r \in R$
d_i	durée de la visite $i \in V$
$t_{z_1 z_2}$	durée du transport entre les patients $z_1 \in Z$ et $z_2 \in Z$
D_r^+	lieu de départ de la tournée du soignant $r \in R$
D_r^-	lieu de fin de la tournée du soignant $r \in R$
τ_z^o	= 1 si le soignant $o \in O$ est régulier pour le patient $z \in Z$, 0 sinon
Φ_r^i	= 1 si la visite $i \in V$ est bloquée pour le soignant $r \in O$, 0 sinon
σ_z^i	= 1 si le patient $z \in Z$ est concerné par la visite $i \in V$, 0 sinon
ω_{ij}	= 1 si la visite $i \in V$ et la visite $j \in V$ forment une visite partagée, 0 sinon

Le coût des pénalités lors de la réalisation d'une visite par un soignant non régulier est pondéré par un facteur μ . Lors d'une visite partagée, au moins un soignant régulier doit être présent, cela est suffisant pour ne pas engendrer de pénalité.

Les variables de décision sont les suivantes :

x_{ijr}	= 1 si un soignant sur la tournée $r \in R$ réalise la visite $i \in V$ puis la visite $j \in V$, 0 sinon
s_i	= date de début de la visite $i \in V$
f_i	= date de fin de la visite $i \in V$

Pour la modélisation, l'auteur fait les hypothèses suivantes ;

- tous les soignants ont les mêmes qualifications et peuvent donc réaliser toutes les visites,
- une visite partagée débute et se termine au même moment pour les deux soignants.

L'objectif du modèle est de construire les tournées de chaque soignant en minimisant les temps de transport des soignants et en favorisant les visites réalisées par les soignants réguliers, une tournée étant une suite ordonnée de visites. La modélisation est basée sur le VRPTW sans contrainte de capacité. La fonction objectif est la somme de trois termes (2.38), (2.39) et (2.40)

$$D = \sum_{r \in R} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{z_1 \in Z} \sum_{z_2 \in Z} \sigma_{z_1}^i \sigma_{z_2}^j t_{z_1 z_2} x_{ijr} \quad (2.38)$$

$$P_1 = \mu \cdot \sum_{r \in R} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{z \in Z} (1 - \Phi_r^i) \cdot (1 - \tau_z^r) \cdot (1 - \omega_{ij}) \cdot x_{ijr} \quad (2.39)$$

$$P_2 = \frac{\mu}{2} \cdot \sum_{r_1 \in R} \sum_{r_2 \in R} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{z \in Z} \sum_{k_1 \in V} \sum_{k_2 \in V} (1 - \Phi_{r_1}^i) \cdot (1 - \Phi_{r_2}^j) \cdot (1 - \tau_{z_1}^{r_1}) \cdot (1 - \tau_{z_2}^{r_2}) \cdot \omega_{ij} \cdot \sigma_z^i \cdot x_{ik_1 r_1} \cdot x_{ik_2 r_2} \quad (2.40)$$

L'expression (2.38) calcule le temps de déplacement des soignants. L'expression (2.39) détermine les pénalités liées à l'affectation des visites non partagées et non bloquées aux soignants non réguliers. Enfin, l'expression (2.40) calcule les pénalités lors des visites partagées effectuées par deux soignants non réguliers. μ est le poids donné à ces pénalités. Plus μ est élevé, plus les pénalités seront importantes par rapport aux temps de déplacement. Les contraintes du modèle proposé par l'auteur sont les suivantes :

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in V} x_{ijr} = 1 \quad \forall i \in V \quad (2.41)$$

$$\sum_{j \in V} x_{D_r^+ j r} = 1 \quad \forall r \in R \quad (2.42)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i D_r^- r} = 1 \quad \forall r \in R \quad (2.43)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ikr} - \sum_{j \in V} x_{kjr} = 0 \quad \forall k \in V, \forall r \in R \quad (2.44)$$

$$s_i + d_i = f_i \quad \forall i \in V \quad (2.45)$$

$$s_i \cdot \omega_{ij} \leq s_j \quad \forall i \in V, \forall j \in V \quad (2.46)$$

$$x_{ijr} \cdot s_i \geq g_r \quad \forall i \in V, \forall j \in V, \forall r \in R \quad (2.47)$$

$$x_{ijr} \cdot f_j \leq h_r \quad \forall i \in V, \forall j \in V, \forall r \in R \quad (2.48)$$

$$f_i + \sum_{z_1 \in Z} \sum_{z_2 \in Z} \sigma_{z_1}^i \cdot \sigma_{z_2}^j \cdot t_{z_1 z_2} - M \cdot (1 - x_{ijr}) \leq s_j \quad \forall i \in V, \forall j \in V, \forall r \in R \quad (2.49)$$

$$s_i \geq a_i \quad \forall i \in V \quad (2.50)$$

$$s_i \leq b_i \quad \forall i \in V \quad (2.51)$$

$$\sum_{j \in V} \Phi_r^i \cdot x_{ijr} = 1 \quad \forall i \in V, \forall r \in R \quad (2.52)$$

$$s_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (2.53)$$

$$x_{ijr} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V, \forall j \in V, \forall r \in R \quad (2.54)$$

Les contraintes (2.41) vérifient que chaque visite est réalisée par un soignant. Selon les contraintes (2.42) et (2.43) la tournée de chaque soignant débute à son lieu de départ et se termine à son lieu de fin. Les flux sont conservés selon les contraintes (2.44). Les contraintes (2.45) permettent de calculer les dates de fin des visites. Les visites partagées débutent à la même date pour les deux soignants selon les contraintes (2.46). Les contraintes (2.47) et (2.48) vérifient que les fenêtres de temps de disponibilité des soignants sont respectées. Les contraintes (2.49) vérifient que les temps de transport entre les visites sont pris en compte et déterminent les dates de début des visites. Les contraintes (2.50) et (2.51) imposent le respect des dates de début au plus tôt et au plus tard des visites. Chaque soignant réalise une visite bloquée selon les contraintes (2.52). Enfin, les dates de début des visites sont positives et les variables x_{ijr} binaires d'après les contraintes (2.53) et (2.54).

Le modèle proposé n'est pas linéaire. En effet, la fonction objectif intègre un terme quadratique (2.40). Les contraintes (2.47) et (2.48) sont également quadratiques.

Pour trouver des solutions, l'auteur propose deux méthodes :

- une heuristique dédiée basée sur des insertions,
- une recherche tabou.

La première méthode est une heuristique d'insertion. L'ensemble des visites affectées à une tournée (V^-) et des visites non affectées (V^+) à une tournée forment une partition de l'ensemble des visites V . Lors de l'initialisation de l'heuristique, V^- contient les points de départ de chaque soignant et V^+ toutes les visites à réaliser. Ensuite, pour chaque élément $v \in V^+$ un coût est associé à l'insertion de v dans la tournée de chaque soignant dans chaque position de la tournée ainsi qu'une date de début de réalisation de la visite. Cette date est le maximum entre la date d'arrivée du soignant au domicile du

patient (date de fin de la visite précédente à laquelle on ajoute le temps de transport) et le début de la période de disponibilité du patient (a_i). Si l'insertion entraîne la non-faisabilité de la solution, le coût est supposé infini. Si toutes les insertions entraînent une solution non réalisable, un soignant est ajouté. Le coût est composé du temps de trajet pour aller réaliser la visite ainsi que d'une éventuelle pénalité liée au choix d'un soignant non régulier. Ensuite, la visite qui a le coût le plus faible est insérée dans la tournée d'un soignant à la meilleure position. Le processus est itéré jusqu'à ce que V^+ soit vide.

La seconde méthode proposée est une recherche tabou. L'auteur autorise des solutions non réalisables. La violation des contraintes (2.46), (2.48) et (2.51) n'entraînent pas le rejet d'une solution cependant des pénalités (α , β et γ) sont ajoutées dans la fonction objectif.

L'algorithme 1 décrit la recherche tabou utilisée par Thomsen (2006). $C(x)$ représente le coût sans les pénalités liées au relâchement des contraintes (2.46), (2.48) et (2.51).

À présent, nous allons présenter les différents éléments de la méthode : systèmes de voisinage, liste

Algorithme 1 : Recherche tabou

```

x est une solution initiale
x* est la meilleure solution réalisable courante
if x est réalisable then
    | x* = x
    |  $C(x^*) = C(x)$ 
else
    |  $C(x^*) = +\infty$ 
end
while le critère arrêt n'est pas atteint do
    | choisir  $\hat{x}$  le meilleur voisin de x qui n'est pas tabou ou qui satisfait les critères d'aspiration
    | if  $\hat{x}$  est réalisable et  $C(\hat{x}) < C(x^*)$  then
    | | x* =  $\hat{x}$ 
    | |  $C(x^*) = C(\hat{x})$ 
    | end
    | x =  $\hat{x}$ 
end

```

tabou et critères d'aspiration. L'auteur propose trois systèmes de voisinage notés N_1 , N_2 et N_3 .

- N_1 consiste à choisir aléatoirement une visite parmi les visites non bloquées et insérer au mieux cette visite dans une autre tournée choisie aléatoirement ;
- N_2 consiste à choisir aléatoirement une visite parmi les visites non bloquées et essayer de l'insérer au mieux dans toutes les autres tournées ;
- N_3 consiste à choisir aléatoirement une tournée et insérer toutes les visites de cette tournée dans les autres tournées.

Après des tests effectués sur une instance composée de 15 soignants, 96 patients et 145 visites, l'auteur constate que le nombre de solutions non réalisables est trop important avec ces trois systèmes de voisinage. En effet, les fenêtres de temps aussi bien pour les patients que pour les soignants ne sont pas respectées et les visites partagées ne commencent pas simultanément pour les deux soignants concernés. Par conséquent, l'auteur privilégie le voisinage complet, c'est-à-dire que le déplacement de toutes les visites est testé. Pour réaliser cela, l'auteur propose trois stratégies :

1. les dates de début et de fin des visites des tournées modifiées sont déterminées à l'aide d'une heuristique. Elle consiste à décaler les visites qui suivent la visite insérée et à reculer les visites qui suivent la visite qui a été supprimée ;
2. les dates de début et de fin des visites des tournées modifiées sont déterminées par un programme linéaire ;

3. les dates de début et de fin des visites de toutes les tournées sont déterminées par un programme linéaire.

La liste tabou interdit qu'une visite retirée d'une tournée ne soit réinsérée dans cette même tournée, quelle que soit sa position, pendant θ itérations. Les critères d'aspiration (une solution est acceptée même si elle fait partie de la liste tabou) sont les suivants :

- lorsqu'une solution est un minimum global,
- lorsqu'une solution est la meilleure dans la région,
- lorsqu'une solution est la meilleure dans les dernières itérations.

De plus, l'auteur intègre dans sa méthode une stratégie de diversification en ajoutant des pénalités dans la fonction objectif suivant le nombre de fois où une même visite a été ajoutée dans une tournée.

Les résultats obtenus avec les deux méthodes sont comparés avec des résultats obtenus à l'aide d'un logiciel commercial développé par René Jorgensen et Jesper Larsen (Automatic Visit Scheduling). Les données utilisées pour tester les méthodes correspondent aux semaines 9, 10 et 11 de l'année 2006 d'une ville danoise. Chaque journée correspond à une instance. Le nombre de soignants est compris entre 14 et 20 suivant les jours, le nombre de patients entre 92 et 111 qui représentent 139 à 185 visites chaque jour. Chaque jour, quatre visites nécessitent deux soignants au domicile d'un patient.

La solution initiale de la recherche tabou est déterminée par l'heuristique d'insertion. La recherche tabou permet d'améliorer les résultats de 6,7% à 19,7% quelle que soit la valeur de μ (μ définit le poids des pénalités pour les ressources non régulières) et pour toutes les instances. L'amélioration moyenne est alors d'environ 11%. En comparant les résultats obtenus avec le logiciel AVS, aussi bien l'heuristique que la recherche tabou améliorent les résultats de manière importante (entre 30% et 80% suivant les instances).

1.2.3 Bredström et Rönnqvist (2008)

$1P, Disp_P, Tr_1 | Pref_P, Prec, Sync | C_T$
 $1P, Disp_P, Tr_1 | Pref_P, Prec, Sync | Balance$
 $1P, Disp_P, Tr_1 | Pref_P, Prec, Sync | Satis$
 $1P, Disp_P, Tr_1 | Pref_P, Prec, Sync | C_T, Satis$

Bredström et Rönnqvist (2008) travaillent sur un problème mono-type avec contraintes de précedence et de synchronisation. Une activité qui nécessite deux ressources est modélisée par deux activités qui doivent être réalisées simultanément au domicile du patient par deux ressources distinctes. Les auteurs considèrent trois critères :

- la durée des tournées,
- le respect de la préférence des patients,
- l'équilibrage des tournées.

Ce dernier critère est calculé en faisant la différence entre la durée de la tournée la plus longue avec la durée de la tournée la plus courte. La préférence d'un patient pour une ressource est exprimée par un nombre réel compris entre -10 et 10. Plus le nombre est proche de -10, plus la ressource est préférée. Pour résoudre le problème, les auteurs proposent une heuristique basée sur la résolution successive de problème relaxé. Cette heuristique est comparable à celle proposée par Fischetti et al. (2003), *local branching heuristic*. La fonction objectif est une somme pondérée des trois critères. Les critères de durée et d'équilibrage sont exprimés en heure et normalisés sur une journée de neuf heures. Les auteurs ont généré des instances de différentes tailles :

- petite : cinq instances de 20 activités dont deux qui nécessitent 2 ressources et 4 ressources,
- moyenne : trois instances de 50 activités dont 5 qui sont synchronisées et 10 ressources,
- grande : deux instances de 80 activités dont 8 synchronisées et 16 ressources.

Suivant la taille des instances, les critères utilisés sont différents. Pour les instances de petite taille, les auteurs résolvent le problème avec chacun des critères pris séparément ainsi que la somme des critères de durée et d'équilibrage. Pour les instances de taille moyenne et grande, les auteurs font la somme pondérée des critères de durée et d'équilibrage. Pour chaque instance, les auteurs proposent cinq longueurs de fenêtres de temps :

- instances F (*fixed*) : la date de début de chaque activité est fixée, l'amplitude des fenêtres de temps est nulle,
- instances S (*small*) : l'amplitude moyenne des fenêtres de temps de début des activités varie entre 1,3 et 1,8 heures suivant les instances,
- instances M (*medium*) : l'amplitude moyenne des fenêtres de temps est comprise entre 2,1 et 2,9 heures suivant les instances,
- instances L (*large*) : l'amplitude moyenne des fenêtres de temps varie entre 2,9 et 3,9 heures suivant les instances,
- instances A (*no restrictions*) : les dates de début des activités ne sont pas soumises à des contraintes de fenêtres de temps.

Sur les petites instances, les résultats de l'heuristique sont comparés aux résultats obtenus avec CPLEX en limitant le temps de calcul à soixante minutes. Le temps de calcul de l'heuristique est limité à deux minutes. Les auteurs retrouvent la solution optimale pour 39% des instances. De plus, pour 19% des instances, les résultats de l'heuristique sont de meilleure qualité que la borne supérieure trouvée avec CPLEX limité à soixante minutes. Dans les autres cas, les résultats sont de moins bonne qualité (cela correspond essentiellement aux instances avec des fenêtres de temps L ou A). Pour les instances de taille moyenne et grande, CPLEX ne donne pas de solution, il n'y donc pas de comparaison possible. Cependant, les auteurs constatent que sur cinq instances, l'heuristique ne trouve pas de solution pour deux instances (une moyenne et une grande) avec des fenêtres de temps S et M (les fenêtres de temps F ne sont pas considérées sur ces instances). D'autres auteurs ont travaillé sur ce problème. Ainsi Dohn et al. (2011) proposent une approche basée sur une décomposition de Dantzig-Wolfe. Des travaux similaires sont proposés par Rasmussen et al. (2012). La méthode mise en œuvre est une génération de colonnes en plus de la décomposition de Dantzig-Wolfe.

Affi et al. (2013) et Labadie et al. (2014) ont également travaillé sur le problème de Bredström et Rönnqvist (2008) en utilisant des méthodes approchées de type métaheuristique. Ces deux papiers proposent un algorithme de résolution pour le problème mono-critère où seule la durée est considérée.

Dans le premier papier, les auteurs proposent un algorithme qui suit un schéma de recuit simulé et qui utilise plusieurs recherches locales dédiées comme indiqué dans Affi et al. (2015). Une solution initiale est construite avec une procédure *BestInsertion* (insertion de la visite qui engendre la plus faible augmentation du coût de la solution). Lorsqu'il est impossible d'insérer la visite dans les tournées existantes, une nouvelle tournée est ajoutée. Une procédure de destruction/construction est utilisée durant la phase de diversification. Elle consiste à retirer aléatoirement un nombre de visites des tournées de la solution courante et à les réinsérer en utilisant la procédure *BestInsertion*. Dans la phase de recherche locale, deux systèmes de voisinage sont utilisés : $2 - opt^*$ (échange de chemin entre des tournées différentes) et $or - opt$ (modifier la position de une à trois villes successives dans la même tournée). Les auteurs testent leur méthode sur les instances S , M et L de Bredström et Rönnqvist (2008) avec le critère durée. Sur les petites instances, les temps de résolution sont très courts, 0.5 à 4.66 secondes pour les instances étudiées (instances $1L$, $2L$, $3M$, $4M$ et L). Pour les instances de taille moyenne (resp. grande), les temps de résolution varient entre 93 et 3358 secondes (resp. 376 et 3247 secondes).

Labadie et al. (2014) proposent une résolution à l'aide d'une recherche locale itérée. Deux types de voisinage sont utilisés dans la recherche locale :

- $2 - opt$ dans une tournée ;
- $k - exchange$ qui est composé de trois mouvements :
 - choix aléatoire d'une visite et réinsertion dans une autre tournée ;

- choix aléatoire de deux visites qui sont ensuite échangées ;
- 2 – opt^* décrit précédemment.

La diversification est assurée par l'application d'un opérateur *relocate* qui consiste à concaténer toutes les tournées et à choisir aléatoirement des visites. Ensuite, la position de ces visites est modifiée dans la permutation.

Des tests sont effectués sur des instances développées à partir des instances de Bredström et Rönnqvist (2008). Le nombre de ressources varie entre 3 et 16, le nombre d'activités entre 8 et 45. Le nombre d'activités synchronisées est compris entre 1 (pour les instances à 8 activités) et 8 (pour les instances à 45 activités). Le critère de performance choisi est la durée des tournées. Les résultats obtenus avec les métheuristiques sont comparés aux résultats obtenus avec le solveur GUSEK pour les petites instances (moins de 12 activités (dont 2 synchronisées) et 5 ressources). Pour les instances de taille supérieure, GUSEK ne trouve pas de solution. Les temps de calcul sont plus faibles avec la recherche locale itérée, cependant les solutions trouvées avec le solveur sont meilleures (écarts inférieurs à 3%).

1.2.4 Ben Bachouch et al. (2008)

$$1P, Disp_P, Tr_1, Disp_R, Qualif_R, Break_R, Dist_{max} | Pref_P, Sync | C_r$$

Ben Bachouch et al. (2008) proposent un modèle linéaire pour la construction de tournées de soins sur une période. Le modèle intègre des caractéristiques relatives aux patients (période de disponibilité pour recevoir des soins), et aux ressources (disponibilité, niveau de qualification, pause). De plus, des activités sont synchronisées et la distance entre deux domiciles successifs dans une tournée est bornée. La résolution est faite avec deux méthodes, la programmation linéaire et la programmation par contraintes.

Les méthodes sont testées sur des instances de différente taille, 3 à 7 infirmiers et 9 à 20 patients. Les résultats obtenus sont identiques pour les deux méthodes, seul le temps de résolution varie, la programmation linéaire étant plus efficace dans quasiment tous les cas. Il faut noter que l'instance la plus grande n'a pas été résolue avec une limite de temps de deux heures.

1.2.5 Redjem et al. (2012)

$$1P, Disp_P, Tr_1 | Sync | C_T, \sum_{WT}$$

$$1P, Disp_P, Tr_1 | Sync | \sum_{SD}$$

Redjem et al. (2012) proposent un programme linéaire pour la construction de tournées de soins. Les caractéristiques prises en compte sont la synchronisation d'activités et la disponibilité des patients. L'objectif est de construire les tournées du personnel soignant en optimisant indépendamment les critères suivants :

- la somme des temps de transport et des temps d'attente des soignants,
- la date de début au plus tôt des soins (afin de réaliser les soins au plus tôt).

La résolution est faite à l'aide du solveur LINGO. Des tests sont effectués sur des instances composées de quinze patients et quatre ressources. Les temps de résolution sont de vingt minutes pour obtenir un gap entre la solution optimale et la solution courante inférieur à 4%.

2 Présentation des modèles multi-type

2.1 Modèle sans contraintes de synchronisation - Begur et al. (1997)

$$1P, Tr_x, Disp_R | C_T$$

Begur et al. (1997) présentent une architecture logicielle pour la construction de tournées de soins à domicile sur un horizon de cinq jours. Les auteurs intègrent dans le problème les types de ressources.

Un médecin et un infirmier, par exemple, ne réalisent pas les mêmes soins. Pour cela, les auteurs développent une heuristique pour l'élaboration des tournées des soignants. L'objectif est de réaliser les tournées des soignants en minimisant le temps de trajet total. Les auteurs intègrent 3 types de contraintes :

- ne pas emprunter des routes en travaux,
- respecter le temps de disponibilité des infirmiers,
- intégrer la fréquence des visites de chaque patient sur l'horizon considéré.

Chaque jour, l'ensemble de patients à visiter est connu. La planification de chaque journée de l'horizon est indépendante de celle des autres jours. Pour résoudre le problème, les auteurs font le choix d'une heuristique qui ne demande pas de ressources de calculs importantes pour que l'outil d'aide à la décision puisse être utilisé sur un ordinateur personnel. Les auteurs ont choisi une heuristique de type *savings* (cf. section 1.1.9).

2.2 Modèle avec contraintes de synchronisation - Kergosien et al. (2009)

$1P, Disp_P, Tr_x, Disp_R | Reg_R, Prec, Sync | C_T$

Kergosien et al. (2009) ont également travaillé sur le problème de tournées de soins à domicile. Les auteurs proposent un modèle linéaire qui intègre les types de ressources. Chaque activité nécessite une ou plusieurs ressources pour être réalisée. Un délai entre activités peut être pris en compte c'est-à-dire qu'une activité doit être réalisée un temps défini avant une autre activité pour un patient donné. Lorsque le délai entre les deux activités est nul, les deux activités sont donc réalisées simultanément au domicile du patient par deux ressources différentes. Nous retrouvons le cas d'activités synchronisées vu dans certains papiers présentés précédemment. Ensuite, si le délai entre les deux activités de soins n'est pas nul, il est préférable que ce soit toujours la même ressource de chaque type qui réalise les soins chez un même patient. Les tournées débutent et se terminent au dépôt ou au domicile de la ressource selon le choix de chacune des ressources. La modélisation mathématique est basée sur le modèle du m-TSPTW où chaque activité réalisée chez un patient est un nœud du graphe. Le critère retenu est la somme des durées de chacune des tournées. La résolution du modèle avec un solveur linéaire est précédée d'une phase de pré-traitement. Par exemple, lorsque les fenêtres de temps de deux activités se chevauchent, elles ne peuvent pas être réalisées par la même ressource. Les instances sont composées de dix à quarante activités. Le nombre de types de ressources varie entre un et trois. Les activités de soins durent entre dix et soixante minutes. L'amplitude des fenêtres de temps est comprise entre une heure et demi et trois heures. Le nombre de ressources est défini afin que pour chaque instance, le taux d'occupation soit de 70%. Quel que soit le nombre d'activités, le temps de résolution des instances avec un seul type de ressources est plus important. Une solution optimale est obtenue pour toutes les instances composées de dix activités pour un, deux ou trois types de ressources. Pour les instances à vingt activités, une solution optimale est trouvée lorsqu'il y a deux ou trois types de ressources. Dans tous les autres cas, le solveur ne donne pas de solution optimale en moins de dix minutes. Enfin, une comparaison est réalisée entre une résolution avec les pré-traitements et sans les pré-traitements. Les auteurs montrent alors que la présence des pré-traitements diminue le temps de résolution mais ne permet pas d'obtenir des solutions optimales pour les instances non optimalement résolues sans les pré-traitements.

Allaoua et al. (2013) ont également travaillé sur la construction de tournées de soins à domicile avec les mêmes caractéristiques et sur les mêmes instances. Cependant l'objectif différent puisqu'il consiste à minimiser le nombre de ressources pour réaliser toutes les activités. La méthode de résolution proposée est une matheuristique basée sur une décomposition en deux sous-problèmes. Le premier est un problème de partitionnement afin d'affecter les soignants aux patients. Le second concerne la construction des tournées dans chaque partition et est modélisé par un problème de m-TSPTW.

	PLNE	<i>branch & price</i>	<i>branch price & cost</i>	Heuristique spécifique VRP	Heuristique dédiée	Génération de colonnes	Méta-heuristique	Prog. par contraintes
(Begur et al. 1997)				X				
(Cheng et Rich 1998)							X	
(De Angelis 1998)	X							
(Bertels et Fahle 2006)	X						X	X
(Thomsen 2006)					X		X	
(Eveborn et al. 2006)	X				X			
(Akjiratikarl et al. 2007)							X	
(Bredstrom et al., 2008)					X			
(Ben Bachouch et al. 2008)	X							X
(Kergosien et al. 2009)	X							
(Rasmussen et al. 2012)		X						
(Redjem et al. 2012)	X							
(Trautsamwieser et al. 2011)							X	
(Gourc et al. 2013)							X	
(Trautsamwieser et al. 2014)			X					
(Morito et al. 2014)						X		
(Fikar et Hirsch 2014)				X			X	
(Cattafi et al. 2012)								X
(Riazi et al. 2014)				X				

Tableau 2.8 – Méthodes de résolution

3 Synthèse des méthodes de résolution

Comme nous l'avons constaté, les méthodes proposées sont variées et ont fait leurs preuves pour la construction de problèmes de tournées de soins à domicile. Tout d'abord, la Programmation Linéaire a été utilisée dans cinq papiers et apporte de bons résultats sur des instances de petite taille (avec moins de trente activités), (De Angelis 1998), (Bertels et Fahle 2006), (Eveborn et al. 2006), (Ben Bachouch et al. 2008), (Kergosien et al. 2009), (Redjem et al. 2012).

Sur des instances de taille plus importante, d'autres approches sont proposées pour trouver des solutions et limiter les temps de calcul. Un algorithme de *branch and price* a été utilisé par (Rasmussen et al. 2012). Un algorithme de *branch-price and cut* a été proposé par (Trautsamwieser et Hirsch 2011). Différentes heuristiques ont été utilisées, des heuristiques dédiées aux problèmes de tournées de véhicules comme l'heuristique savings (Begur et al. 1997), (Fikar et Hirsch 2014) ou un algorithme gossip (Riazi et al. 2014), ou des heuristiques développées spécialement pour ce problème comme (Thomsen 2006) ou (Eveborn et al. 2006). (Bredström et Rönnqvist 2008) proposent une heuristique basée sur des relaxations linéaires successives. (Morito et al. 2014) développent une heuristique basée sur la génération de colonnes.

Les métaheuristiques sont également présentes avec des méthodes à individu comme la recherche locale (Cheng et Rich 1998), la recherche tabou (Thomsen 2006), (Liu et al. 2013), (Fikar et Hirsch 2014), (Gourc et al. 2013), le recuit simulé (Bertels et Fahle 2006) ou la recherche à voisinage variable (Trautsamwieser et Hirsch 2011). Les méthodes à population sont également présentes même si moins représentées avec l'optimisation par essaim particulaire mise en œuvre par (Akjiratikarl et al. 2007).

Enfin des approches de programmation par contraintes sont utilisées par (Bertels et Fahle 2006), (Ben Bachouch et al. 2008) et (Cattafi et al. 2012). Le tableau 2.8 résume les méthodes utilisées par les différents auteurs cités précédemment.

Suivant les structures de maintien à domicile et le pays auquel elles appartiennent, les caractéristiques des problèmes traités dans la littérature diffèrent. Cependant certains points sont communs à de nombreux travaux comme la prise en compte de périodes de disponibilité des patients, les types ou le niveau de qualification des ressources par exemple. Le critère d'évaluation de la performance le plus utilisé est le coût du transport, en deuxième position arrive la satisfaction. Ce critère intègre deux dimensions, la satisfaction des patients (respect de la préférence exprimée pour une ressource majoritairement) et la satisfaction des ressources à travers un respect de niveau de qualification.

4 Positionnement de notre problème dans la littérature

Le problème que nous traitons dans ce mémoire porte sur l'organisation de tournées de soins au domicile des patients. Comme nous venons de le voir dans la section précédente, sur les vingt dernières années, de nombreux travaux traitent de ce sujet. La plupart des caractéristiques de notre problème sont prises en compte indépendamment les unes des autres dans ces différents travaux. Pour commencer, la disponibilité des patients, traitée traditionnellement sous la forme de contraintes de fenêtres de temps apparaît dans la quasi totalité des papiers étudiés. Ensuite, la synchronisation des activités de soins apparaît dans sept papiers (sur les vingt référencés dans ce chapitre) comme, par exemple, dans Bredström et Rönnqvist (2008), Kergosien et al. (2009) ou plus récemment Redjem et al. (2012). La prise en compte de la préférence des patients est également une caractéristique présente dans huit papiers de la littérature. Nous pouvons citer, par exemple, Bertels et Fahle (2006), Bredström et Rönnqvist (2008) ou Morito et al. (2014).

Seuls les travaux de Eveborn et al. (2006), Bredström et Rönnqvist (2008) et Ben Bachouch et al. (2008) prennent en compte simultanément les caractéristiques évoquées jusqu'à maintenant. Notre problème intègre le niveau de dépendance des patients pour la construction des tournées de soins afin d'équilibrer le travail des différents soignants. Bien qu'évoquée dans les perspectives des travaux de Gourc et al. (2013), cette caractéristique n'est pas intégrée dans les modèles de la littérature que nous connaissons. Il faut cependant noter que la notion d'équilibrage des tournées (liée au niveau de dépendance dans nos travaux) est présente (Borsani et al. (2006), Bredström et Rönnqvist (2008) ou Gourc et al. (2013)) mais qu'elle est réalisée suivant la durée des tournées.

Pour terminer, nous souhaitons construire les tournées de l'ensemble des personnels des structures de maintien à domicile. Nous devons donc intégrer les types de ressources afin que chaque ressource réalise uniquement des tâches pour lesquelles elle est formée. Dans la littérature, cet aspect est abordé sous l'angle des qualifications ou des types de ressources. Nous avons fait le choix de prendre en compte les types de ressources afin de pouvoir intégrer différents métiers présents dans les structures de soins à domicile, aussi bien des professions médicales (médecins, infirmiers, ...) que non médicales (coursiers). Dans les papiers que nous avons étudiés, deux travaux traitent de problèmes avec plusieurs types de ressources : Begur et al. (1997) et Kergosien et al. (2009).

Nous constatons donc qu'en dehors du niveau de dépendance des patients, toutes les caractéristiques de notre problème existent dans les travaux de la littérature mais qu'aucun ne les traite simultanément. Les travaux les plus proches sont ceux de Bredström et Rönnqvist (2008) mais ils ne prennent pas en compte les types de ressources et les niveaux de dépendance des patients et ceux de Kergosien et al. (2009) qui n'intègrent pas l'équilibrage des tournées suivant les niveaux de dépendance ou les préférences des patients.

Conclusion

Dans ce chapitre, une classification et une notation ont permis de structurer l'état de l'art concernant les problèmes d'organisation de tournées de soins à domicile. La majorité des papiers étudiés concernent les services d'hospitalisation à domicile et traitent de la construction de tournées pour les infirmiers

de ces services. Des modèles de la littérature ont été présentés ainsi que les méthodes de résolution proposées par les auteurs cités. Nous constatons que les problèmes traités dans la littérature sont variés, les contraintes prises en compte sont spécifiques à chaque auteur.

Les caractéristiques les plus présentes concernent la disponibilité des patients et des ressources (planning de travail), la préférence des patients. Le critère à optimiser le plus classique est le coût de transport (à travers la durée des tournées ou la distance parcourue par les ressources). Peu de travaux intègrent la dimension de type de ressources. La synchronisation d'activités est principalement traitée à l'aide de la programmation linéaire. Les travaux de Gourc et al. (2013) définissent en perspective la nécessité de travailler sur l'équilibrage des tournées suivant le niveau de dépendance des patients ainsi que la replanification des tournées en cas d'absence d'une ressource. Ces deux aspects sont abordés dans ce mémoire, l'équilibrage dans le chapitre 4 et la replanification dans le chapitre 5 section I. Nous n'avons pas trouvé de travaux traitant de problèmes de tournées de véhicules avec prise en compte des types de ressources et des contraintes de synchronisation utilisant des méthodes approchées de type métaheuristique.

Chapitre 3

Modélisation de l'organisation des tournées de soins à domicile

Sommaire

Introduction	72
I Problème réel	73
1 Présentation des données de base	73
2 Intégration du problème d'organisation des tournées	74
II Analyse des besoins	75
1 Organisation/réorganisation	75
2 Simulation	75
3 Consultation	76
III Problème traité	76
1 Analyse	76
2 Modélisations mathématiques	79
2.1 Notations	79
2.2 Premier modèle	80
2.2.1 Contraintes	80
2.2.2 Fonction objectif	81
2.3 Second modèle	81
Conclusion	82

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les modèles de la littérature qui traitent de l'organisation de tournées de soins à domicile. Nous avons constaté que les modèles de la littérature ne répondent pas complètement à notre problématique. Pour appréhender notre problème, nous avons suivi la démarche de modélisation proposée par Gourgand et Kellert (1991) qui est résumée dans la figure 3.1. Les domaines d'étude sont aussi divers que les systèmes industriels, les chaînes logistiques, les systèmes hospitaliers, les systèmes urbains, ...

La première étape consiste à construire le modèle de connaissance. Elle est découpée en deux phases :

- analyse : cette phase permet de comprendre le système et les acteurs qui interviennent dans ce système. Les acteurs du système et les experts en modélisation se concentrent sur la compréhension du problème, l'étude des informations sur le système à modéliser, la définition des objectifs et les contraintes à respecter.
- spécification : les entités et leurs relations sont recueillies et structurées. Les données et les règles de gestion sont présentées. Le but de cette étape est d'aboutir à un modèle de connaissance qui correspond à un formalisme dans un langage naturel ou graphique formalisé de la structure et du fonctionnement du système.

Le deuxième étape est la réalisation du modèle d'action en précisant la conception et l'implémentation. Le modèle de connaissance validé est l'entrée principale du processus d'élaboration du modèle d'action. C'est une traduction du modèle de connaissance dans un langage de programmation par exemple.

La troisième étape est la mise en œuvre du modèle d'action construit. Il permet d'évaluer les critères de performance du système définis dans la première étape ce qui aboutit au modèle de résultat. L'analyse des résultats va permettre d'identifier des pistes d'amélioration pour réaliser l'étape 4 en agissant sur le système, et, si nécessaire, sur le modèle de connaissance, en modifiant sa structure et son fonctionnement.

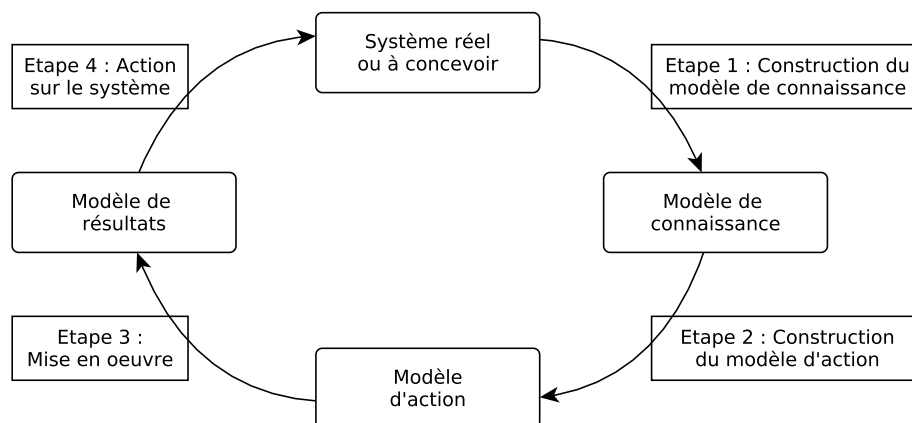


Figure 3.1 – Démarche de modélisation - Gourgand et Kellert (1991)

Dans ce chapitre, nous présentons l'étape 1 du processus pour aboutir au modèle de connaissance. Pour cela, nous débutons par les phases d'analyse et de spécification du problème réel. Ensuite, nous décrivons les fonctionnalités attendues de l'outil d'aide à la décision que nous avons développé. Enfin, nous terminons par les hypothèses que nous avons faites pour aboutir au modèle de connaissance du problème traité. L'étape 2, la construction du modèle d'action, fait l'objet du chapitre suivant.

I Problème réel

Suite à des échanges avec le service de HAD de l'hôpital de Montluçon, la HAD63 et le SSIAD de la ville de Montluçon, nous avons réalisé une modélisation d'un service de maintien à domicile. Pour cela, nous avons utilisé le langage UML (*Unified Modeling Language*) et plus particulièrement les diagrammes de classes. La première étape est une modélisation des données de base. La seconde intègre le problème d'organisation des soins à domicile.

1 Présentation des données de base

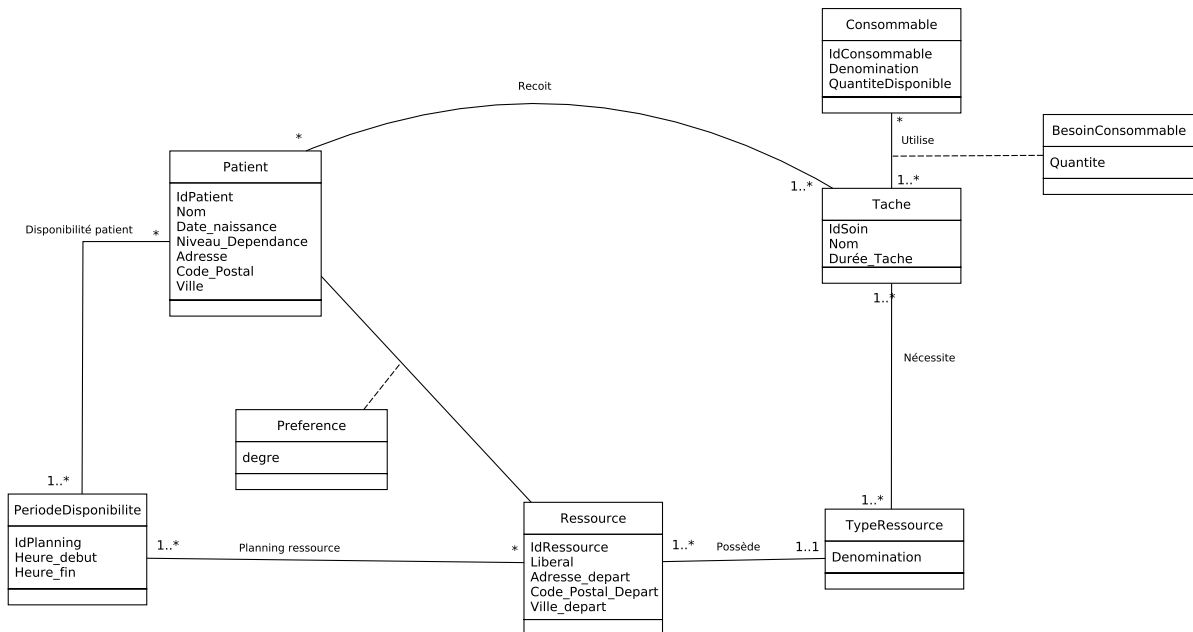


Figure 3.2 – Modélisation des données de base

Un service de maintien à domicile prend en charge un ensemble de patients. Les patients sont admis après accord du responsable de la structure. Pour chaque **patient**, on connaît son nom, sa date de naissance, son adresse, le code postal et la ville dans laquelle il réside. Un patient est également caractérisé par son niveau de dépendance. Le niveau de dépendance est défini à l'aide de la grille AGGIR telle que nous l'avons vue dans le chapitre 1 partie 1.3.2. Les groupes considérés dans les problématiques de maintien à domicile sont les groupes GIR1 à GIR4, 1 correspondant au niveau de dépendance le plus élevé.

Différentes **tâches** sont réalisées au domicile des patients comme prodiguer des soins, livrer des médicaments, livrer des repas, collecter des déchets, ... Ces tâches sont réalisées par des **soignants** ou non soignants regroupés par **type** (médecin, infirmier, aide-soignant, livreur, ...) Une tâche peut nécessiter la présence de un ou plusieurs soignants ou non soignants pour être réalisée. La durée de chaque tâche ne dépend pas de la ressource qui la réalise. Les structures font parfois appel à des ressources libérales en cas de surcharge d'activité, d'éloignement du patient, ... Les ressources non libérales sont soumises à des périodes de disponibilité imposées par la structure qui les emploie. Pour réaliser les tâches, des **consommables** sont utilisés en quantité connue.

En fonction du type de structure, le patient indique ses **périodes de disponibilités** selon le principe qu'en SSIAD le patient peut continuer sa vie sociale, contrairement à la HAD qui est une hospitalisation. Le début des tâches est réalisé pendant ces périodes de disponibilité. Elles sont définies en accord avec le patient en fonction également des disponibilités des aidants. Pour les tâches de soins,

les patients peuvent exprimer le souhait, que nous appelons préférence, d'être soignés par une ressource plutôt qu'une autre. Un patient peut choisir d'être soigné par un homme ou une femme, par un soignant qui parle la même langue par exemple.

La figure 3.2 donne la modélisation des données de base.

2 Intégration du problème d'organisation des tournées

Nous complétons la modélisation des données de base réalisée dans l'étape précédente par la problématique qui nous intéresse, à savoir l'organisation des tournées. Pour cela, nous ajoutons la classe **activité**. Une activité est une tâche ou un ensemble de tâches devant être réalisé chez un patient pendant une période de disponibilité donnée. Pour être réalisée, une activité nécessite une ou plusieurs ressources dont le type est défini suivant les types de soins à réaliser pour cette activité. Les ressources vont au domicile, elles effectuent donc des tournées. Les ressources libérales débutent les tournées de leur domicile défini par Adresse_depart et Ville_Depart. Les ressources internes à la structure débutent leur tournée au siège de la structure, le dépôt, défini également par Adresse_Depart et Ville_depart. Une activité est caractérisée par une date de début et une durée de réalisation. Cette durée est calculée suivant la durée des tâches qui la composent. La date de début des activités permet de reconstituer l'ordre dans lequel chaque tournée est réalisée. La figure 3.3 complète la modélisation des données de base en intégrant l'organisation des soins. Pour résumer, les contraintes identifiées sont les suivantes :

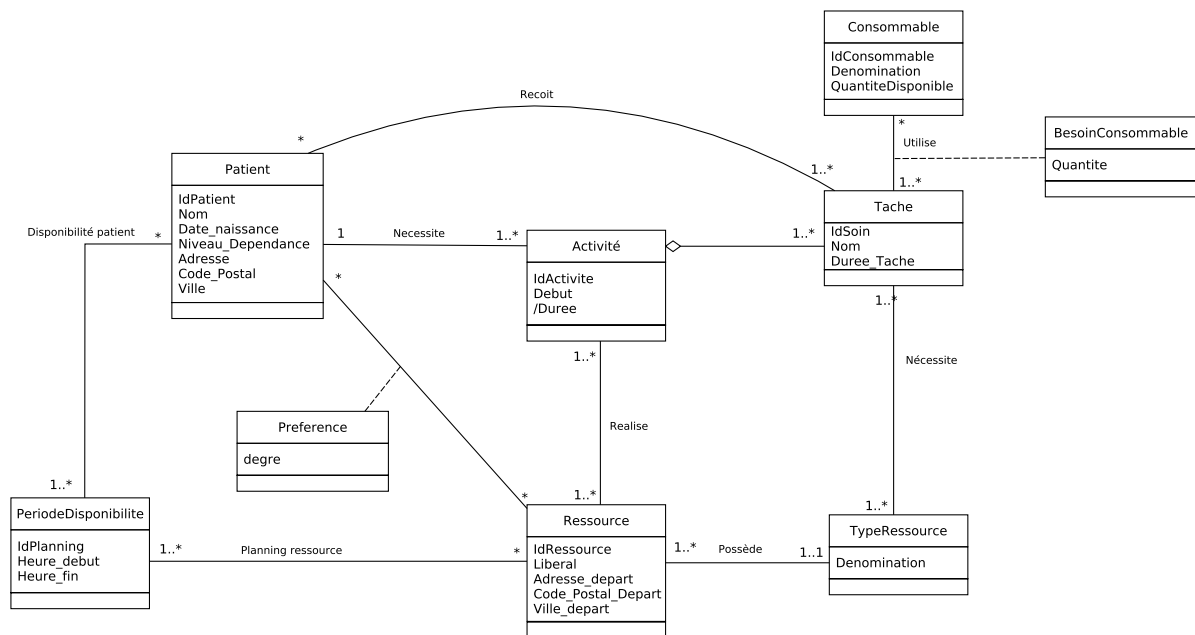


Figure 3.3 – Modélisation des données de base intégrant l'organisation des soins à domicile

- respecter les disponibilités des patients : l'activité doit débuter pendant la période de disponibilité donnée par le patient ;
- respecter le nombre et le type de ressources nécessaires : le nombre de ressources affectées à l'activité doit être égal au nombre de ressources attendu ;
- respecter le type de ressource requis ;
- prendre en compte le temps de transport entre deux domiciles : si une ressource doit réaliser une activité chez deux patients différents, elle ne pourra débuter son activité chez le second patient que x unités de temps après la fin du traitement chez le premier patient, x désignant la durée du transport entre les deux patients.

L'objectif du problème traité est de répartir et ordonner les soins entre les différentes ressources afin de construire les tournées en s'attachant à :

- minimiser la distance parcourue par les ressources ;
- répartir équitablement les patients de même niveau de dépendance entre les tournées ;
- maximiser la préférence des patients

II Analyse des besoins

Pour construire un outil d'aide à la décision qui répond aux attentes des utilisateurs, nous avons défini les fonctionnalités attendues sous la forme d'un diagramme des cas d'utilisation (cf. figure 3.4). Toutes les ressources qui composent la structure de maintien à domicile sont amenées à utiliser l'outil. Cependant deux ont un rôle particulier :

- le médecin qui, entres autres, décide de l'admission d'un nouveau patient et définit les tâches à réaliser suivant la prescription médicale,
- le coordinateur qui s'occupe de la coordination entre les soignants.

L'outil d'aide à la décision doit permettre de répondre aux attentes des soignants des services de HAD ou de SSIAD pour le pilotage opérationnel de la structure. Les fonctionnalités attendues peuvent être classées en trois catégories : organisation/réorganisation, simulation et consultation.

1 Organisation/réorganisation

La vocation première de l'outil est la construction de la tournée de soins à domicile pour chacun des soignants à partir de différentes situations :

Construire les tournées de soins : aucune tournée n'est encore construite, un ensemble d'activités doit être réalisé, un ensemble de ressources est disponible. Il faut donc affecter les ressources aux activités puis construire les tournées. Acteur : coordinateur.

Construire les tournées avec affectation préalable : les activités sont affectées, au préalable, par le coordinateur aux ressources mais l'ordre de réalisation des activités n'est pas défini. Il faut alors construire la tournée de chaque ressource. Acteur : coordinateur

Admettre un patient : un ou plusieurs nouveaux patients sont admis dans la structure et les tournées existantes sont conservées. Ces patients doivent être affectés aux ressources et insérer dans leur tournée. Acteur : médecin

Réorganiser les tournées : une ressource ne peut pas, pour diverses raisons, réaliser les activités qui lui sont affectées, les activités sont dispatchées dans les tournées des autres ressources présentes en perturbant le moins possible leur tournée. Acteur : coordinateur

2 Simulation

Un outil d'aide à la décision propose plusieurs solutions au problème posé suivant des critères et des contraintes préalablement définis. Il aide les décideurs à choisir la solution qui leur semble la meilleure. Par conséquent, le coordinateur peut changer, suivant son expérience par exemple, une ou plusieurs tournées. Il doit pouvoir évaluer l'impact des modifications qu'il choisit de faire.

Évaluer une solution partielle : à partir de la tournée d'une ressource, l'outil permet d'évaluer les critères de performance de la tournée considérée (taux d'utilisation d'une ou plusieurs ressources, rapport du temps de transport sur le temps de soin, durée des tournées, taux de satisfaction des patients, équilibrage de la charge de travail entre les ressources, temps d'attente des ressources, ...). Acteur : coordinateur

Évaluer une solution complète : à partir de la liste ordonnée des activités de chaque ressource, l'outil permet de vérifier le respect des contraintes, calculer l'heure de début des activités et évaluer les critères de performance. Acteur : coordinateur

3 Consultation

Visualiser une tournée : les soignants consultent les informations sur les patients qui composent leur tournée, l'adresse, le niveau de dépendance, ... La visualisation des tournées est primordiale pour qu'une ressource anticipe sa période de travail (heure de début théorique d'une activité chez un patient, soins à réaliser, autre ressource présente dans le cas d'activité synchronisée par exemple). Acteur : ressource

Actuellement, le pilotage des structures de Montluçon est réalisé sans outil informatique et les tournées sont construites à la main sans évaluation des critères de performance.

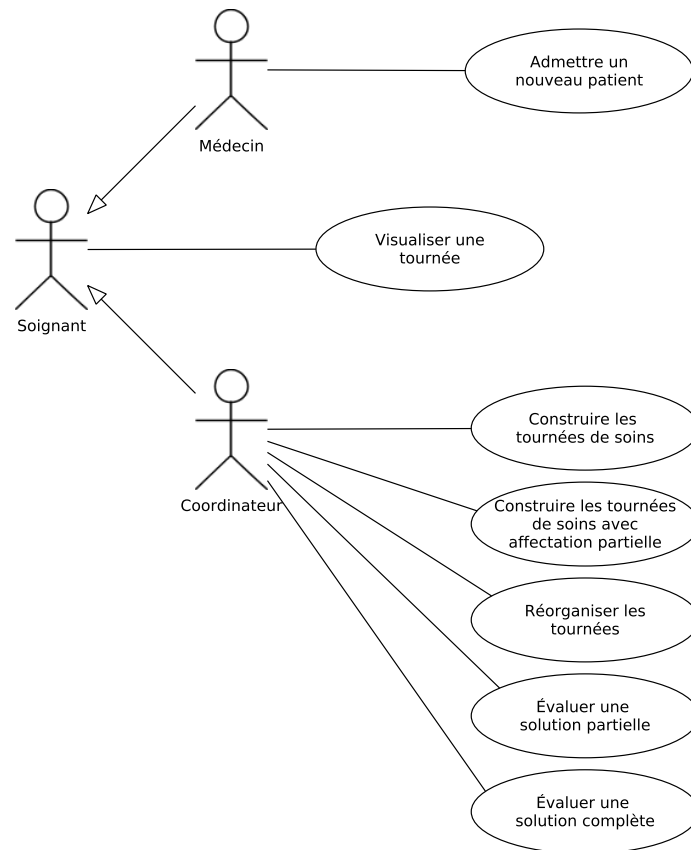


Figure 3.4 – Diagramme des cas d'utilisation

III Problème traité

1 Analyse

Suite à des discussions avec les responsables des deux structures de Montluçon, les hypothèses que nous considérons sont les suivantes :

- Hyp 1 les ressources libérales ne sont pas prises en compte. En effet les ressources libérales organisent leur travail suivant les patients qu'elles ont en charge, y compris les patients hors structure de maintien à domicile.
- Hyp 2 les ressources sont supposées disponibles sur l'horizon considéré. En effet, les tournées doivent être constituées par demi-journée. Le respect des pauses repas n'a donc pas à être satisfait.

- Hyp 3 le niveau de granularité choisi est l'activité. Deux tâches réalisées chez un même patient dans une même période de disponibilité sont en général réalisées par la même ressource. Si deux types de ressource différents sont nécessaires, deux activités différentes seront considérées.
- Hyp 4 les consommables sont supposés en nombre illimité. L'aspect gestion des stocks de consommables au domicile des patients n'est pas considéré dans cette étude.
- Hyp 5 un patient n'a qu'une seule période de disponibilité sur la période considérée.

Le diagramme de classe est donné dans la figure 3.5. Les conséquences des hypothèses simplificatrices sur le diagramme de classes de la figure 3.3 sont les suivantes :

- Hyp 1 \Rightarrow La structure ne gère pas l'organisation du travail des ressources libérales, nous ne les intégrons pas dans la construction des tournées.
- Hyp 3 \Rightarrow Le niveau de dépendance du patient est reporté sur l'activité qui est réalisée à son domicile. Deux activités fictives sont ajoutées aux activités réalisées chez les patients. Elle représente le début et la fin des tournées. Cette activité ne concerne pas un patient donc elle n'a pas de niveau de dépendance et une durée nulle en revanche elle est soumise à une période de disponibilité qui représente la période de disponibilité des ressources.
- Hyp 4 \Rightarrow Les classes Consommable et BesoinConsommable ne sont pas conservées.
- Hyp 2 et 5 \Rightarrow La multiplicité de l'association entre Activite et PeriodeDisponibilite est modifiée car chaque activité ne possède qu'une seule période pendant laquelle l'activité peut débuter.

La distance entre les activités est calculée en fonction de l'adresse et de la ville de chaque patient. Le type de ressource et la préférence des patients sont modélisés par le degré de compatibilité que nous définissons à présent.

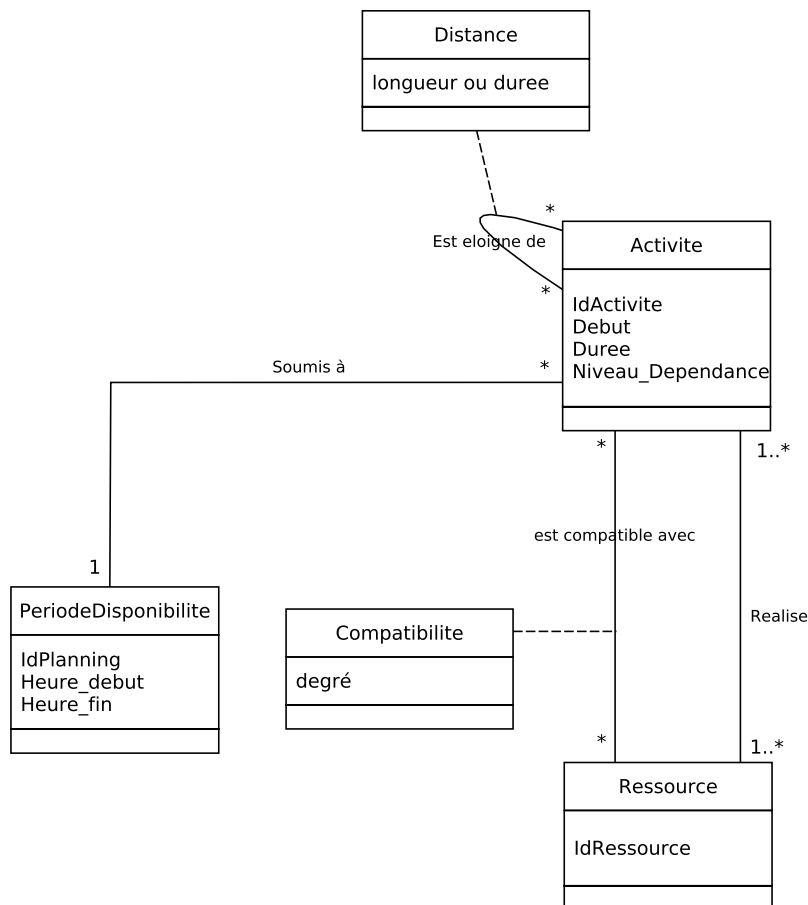


Figure 3.5 – Modèle de connaissance du problème traité

Le degré de compatibilité, un nombre réel compris entre 0 et 1, permet de modéliser deux aspects : le type de ressource et la préférence du patient. Commençons par le type de ressource :

- si le degré de compatibilité est égal à 0, la ressource ne peut pas réaliser l'activité,
- si le degré est strictement supérieur à 0, la ressource peut réaliser l'activité.

Ainsi, lorsqu'un type de ressource ne peut pas réaliser une activité, les degrés de compatibilité entre cette activité et toutes les ressources du type donné seront égaux à zéro. La préférence du patient est également modélisée par le degré de compatibilité. Plus le degré est proche de 1, plus la ressource est souhaitée par le patient.

C_{ik}	r_1	r_2	r_3	r_4
a_1	> 0	> 0	0	0
a_2	> 0	> 0	0	0
a_3	> 0	> 0	0	0
a_4	> 0	> 0	0	0
a_5	0	0	> 0	> 0
a_6	0	0	> 0	> 0

Tableau 3.1 – Degré de compatibilité - type de ressource

Pour illustrer cela, envisageons deux types de ressources (t_1 et t_2) nécessaires pour réaliser six activités aux domiciles des patients. Quatre ressources sont disponibles, deux de chaque type. Les ressources r_1 et r_2 sont de type t_1 et les ressources r_3 et r_4 sont de type t_2 . Quatre activités (a_1, \dots, a_4) nécessitent une ressource de type t_1 et deux activités (a_5, a_6) une ressource de type t_2 . Le tableau 3.1 donne les valeurs du degré de compatibilité pour modéliser les types de ressources de l'exemple.

Ensuite, nous intégrons le second aspect : la préférence du patient. Le patient qui reçoit l'activité a_1 préfère que ce soit la ressource r_2 plutôt que la ressource r_1 qui lui dispense des soins. Par conséquent, $C_{a_1, r_2} > C_{a_1, r_1}$. Concernant l'activité a_2 , le patient n'exprime pas de préférence puisque $C_{a_2, r_1} = C_{a_2, r_2}$. Ces valeurs peuvent être définies par un classement donné par le patient, ou bien s'appuyer sur des critères définis dans les travaux de Bertels et Fahle (2006) résumés dans le chapitre 1 partie I.2 (homme ou femme, langue parlée, ...).

C_{ik}	r_1	r_2	r_3	r_4
a_1	0,2	0,7	0	0
a_2	1	1	0	0
a_3	1	0,2	0	0
a_4	0,7	0,9	0	0
a_5	0	0	0,4	0,7
a_6	0	0	0,8	0,5

Tableau 3.2 – Degré de compatibilité - type de ressource et préférence des patients

Pour résumer, en utilisant la classification et la notation proposées, notre problème est un problème avec plusieurs types de ressource (Tr_x) et des contraintes de synchronisation ($Sync$). Concernant ce dernier point, nous travaillons sur la construction des tournées des ressources médicales ou paramédicales. Cependant, la prise en compte des livraisons de médicaments ou des collectes de déchets peuvent être intégrées sans difficulté en définissant dans les données des tâches réalisées uniquement

par des ressources de type livreur ou coursier. La réserve à émettre tient au capacité des véhicules de livraison ou de collecte qui n'est pas prise en compte dans nos travaux. Le modèle est mono-période ($1P$), il prend en compte les périodes de disponibilité ($Disp_P$) et le niveau de dépendance (Dep_P) des patients. Pour le champ β de notre problème, nous avons les préférences des patients ($Pref_P$) et la synchronisation d'activités. Les critères de performance que nous avons considérés (champ γ) sont les coûts de transport (C_T), l'équilibrage des tournées suivant le niveau de dépendance des patients ($Balance(Dep_P)$) et enfin la satisfaction des patients ($Satisf$). Notre problème est donc noté $1P, Disp_P, Dep_P, Tr_x|Pref_P, Sync|C_T, Balance(Dep_P), Satisf$.

2 Modélisations mathématiques

Nous proposons deux modélisations mathématiques pour l'organisation de tournées de soins à domicile. Ces travaux sont présentés dans Gayraud et al. (2014b). Dans les deux modèles, les données et les variables de décision sont identiques. La différence se fait sur la modélisation de l'équilibrage des tournées suivant le niveau de dépendance des patients. Dans un premier temps, l'équilibrage est un critère de performance et dans un second temps l'équilibrage est considéré comme une contrainte. Le modèle d'organisation de soins à domicile est une extension du m-TSPTW (multiple Traveling Salesmen Problem with Time Windows). Le TSPTW est un problème de voyageur de commerce avec des contraintes temporelles. Il s'agit de construire la tournée d'un véhicule passant une et une seule fois dans chaque ville pendant la fenêtre de temps associée en minimisant le coût. Le m-TSPTW est une extension du TSPTW qui inclut plusieurs véhicules partant d'un même dépôt. Ces deux problèmes sont décrits dans un état de l'art publié par Solomon et Desrosiers (1988). Nous complétons le modèle du m-TSPTW avec les contraintes et les objectifs spécifiques à notre problème.

2.1 Notations

Les notations et les données utilisées dans le modèle sont les suivantes :

$R = \{1, \dots, n_R\}$	ensemble des ressources disponibles
$A = \{1, \dots, n_A\} \cup \{0, n_{A+1}\}$	ensemble des activités à réaliser où les activités 0 et n_{A+1} sont des activités fictives de début et fin de tournée
nb_i	Nombre de ressources requises pour réaliser l'activité $i \in A$
τ_i	Durée de l'activité $i \in A$
$[b_i, e_i]$	Fenêtre de temps pour réaliser l'activité $i \in A$
η_i	Niveau de dépendance du patient qui reçoit l'activité $i \in A$
D_{ij}	Temps de transport entre l'activité $i \in \{0, \dots, n_A\}$ et l'activité $j \in \{1, \dots, n_{A+1}\}$
C_{ik}	Degré de compatibilité entre l'activité $i \in A$ et la ressource $k \in R$
M	Grande valeur

Deux ensembles de variables de décisions sont communs aux deux modèles. Les variables x_{ijk} permettent de déterminer l'ordre dans lequel chaque ressource va réaliser les activités. Les variables z_i correspondent à la date de début de chaque activité.

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si la ressource } k \in R \text{ réalise l'activité } i \in \{0, \dots, n_A\} \text{ avant l'activité } j \in \{1, \dots, n_{A+1}\} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

z_i est la date de début de l'activité $i \in A$

2.2 Premier modèle

Le critère d'équilibrage est modélisé comme dans les travaux de Boutevin (2003) sur les problèmes d'équilibrage de lignes d'assemblage. Nous définissons le niveau de dépendance d'une tournée comme la somme des niveaux de dépendance des activités qui composent la tournée. Nous cherchons donc à minimiser le niveau de dépendance de chaque tournée. Pour cela, nous intégrons une variable supplémentaire δ qui est une borne supérieure du niveau de dépendance des tournées.

2.2.1 Contraintes

Pour répondre au problème présenté, le modèle doit satisfaire les contraintes suivantes :

$$\sum_{j=1}^{n_A+1} \sum_{k=1}^{n_R} x_{ijk} = nb_i, \forall i \in \{1, \dots, n_A\} \quad (3.1)$$

$$\sum_{i=0}^{n_A} \sum_{k=1}^{n_R} x_{ijk} = nb_j, \forall j \in \{1, \dots, n_A\} \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^{n_A} x_{0jk} = 1, \forall k \in R \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^{n_A} x_{i(n_A+1)k} = 1, \forall k \in R \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=0}^{n_A} x_{ilk} = \sum_{j=1}^{n_A+1} x_{ljk}, \forall l \in \{1, \dots, n_A\}, \forall k \in R \quad (3.5)$$

$$z_j \geq z_i + \tau_i + D_{ij} + (x_{ijk} - 1) \cdot M, \forall i \in \{0, \dots, n_A\}, \forall j \in \{1, \dots, n_A + 1\}, \forall k \in R \quad (3.6)$$

$$z_i \geq b_i, \forall i \in \{1, \dots, n_A + 1\} \quad (3.7)$$

$$z_i \leq e_i, \forall i \in \{1, n_A + 1\} \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=0}^{n_A} x_{ijk} \leq C_{jk} \cdot M, \forall j \in \{1, \dots, n_A\}, \forall k \in R \quad (3.9)$$

$$\sum_{i=0}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_A+1} x_{ijk} \cdot \eta_i \leq \delta, \forall k \in R \quad (3.10)$$

Les contraintes (3.1) et (3.2) vérifient le respect du nombre de ressources pour réaliser chaque activité. Les contraintes (3.3) (respectivement (3.4)) imposent que les tournées débutent (respectivement se terminent) au dépôt. Les contraintes (3.5) assurent la conservation des flux. Les contraintes (3.6) vérifient que le temps de transport entre les activités est pris en compte. Les contraintes (3.7) et (3.8) imposent que les activités débutent pendant la fenêtre de temps de disponibilité des patients. La compatibilité ressource(s)/activité est respectée selon les contraintes (3.9). La contrainte (3.10) détermine δ , une borne supérieure du niveau de dépendance de l'ensemble des tournées.

2.2.2 Fonction objectif

Les trois critères sont considérés de manière hiérarchisée. La fonction objectif du modèle est donc la somme pondérée des trois critères :

- la distance totale parcourue T

$$T = \sum_{i=0}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_A+1} D_{ij} \sum_{k=1}^{n_R} x_{ijk} \quad (3.11)$$

- la préférence des patients

$$C = \sum_{j=1}^{n_A} \sum_{k=1}^{n_R} (1 - C_{jk}) \sum_{i=0}^{n_A+1} x_{ijk} \quad (3.12)$$

- δ , le plus haut niveau de dépendance des tournées, δ est définie par les contraintes 3.10

La fonction objectif à minimiser, équation 3.13, est de la forme suivante :

$$\min \alpha_1.T + \alpha_2.\delta + \alpha_3.C \quad (3.13)$$

où $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ sont les coefficients de pondération. La valeur des $(\alpha_i), i \in \{1, 2, 3\}$ est déterminée de telle sorte que la valeur de la fonction objectif soit la concaténation des trois critères. L'ordre est défini suivant la priorité choisie. Par exemple, si le critère T prend des valeurs comprises entre 100 et 999 (par exemple 216) et que les critères δ et C prennent des valeurs comprises entre 10 et 99 (par exemple 15 et 35), les coefficients (α_i) prendront les valeurs décrites dans le tableau 3.3 suivant la priorité choisie. Pour être sûr qu'un critère n'interfère pas avec un autre, le coefficient du critère prioritaire est multiplié par 100 et celui du second critère multiplié par 10.

priorité			coefficients α_i			Exemple
T	δ	C	α_1	α_2	α_3	
1	2	3	100000	1000	1	$\underbrace{216}_T 0 \underbrace{15}_\delta 0 \underbrace{35}_C$
1	3	2	1000000	1	1000	$\underbrace{216}_T 0 \underbrace{35}_C 0 \underbrace{15}_\delta$
2	1	3	1000	10000000	1	$\underbrace{15}_\delta 0 \underbrace{216}_T 0 \underbrace{35}_C$
2	3	1	1000	1	10000000	$\underbrace{35}_C 0 \underbrace{216}_T 0 \underbrace{15}_\delta$
3	1	2	1	10000000	10000	$\underbrace{15}_\delta 0 \underbrace{35}_C 0 \underbrace{216}_T$
3	2	1	1	10000	10000000	$\underbrace{35}_C 0 \underbrace{15}_\delta 0 \underbrace{216}_T$

Tableau 3.3 – Valeurs des coefficients $(\alpha_i) i \in \{1, 2, 3\}$

2.3 Second modèle

Dans le second modèle, l'équilibrage n'est plus considéré comme un critère de performance mais comme une contrainte, un écart entre le niveau de dépendance de chaque tournée est toléré. Cette tolérance est *notée* ϵ . Les tournées seront considérées comme équilibrées si la différence entre le niveau maximum et minimum des tournées est inférieur à la tolérance souhaitée ϵ . Nous ajoutons ϵ aux données

utilisées dans le modèle 1. Les contraintes (3.1) à (3.9) sont conservées. En revanche, les contraintes (3.10) sont remplacées par la contrainte (3.14).

$$\max_{k \in R} \left(\sum_{i=0}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_{A+1}} \eta_i \cdot x_{ijk} \right) - \min_{k \in R} \left(\sum_{i=0}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_{A+1}} \eta_i \cdot x_{ijk} \right) \leq \epsilon \quad (3.14)$$

Cette contrainte n'est pas linéaire, elle peut cependant être linéarisée sous la forme des contraintes 3.15.

$$\sum_{i=0}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_{A+1}} \eta_i \cdot x_{ijk} - \sum_{i=0}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_{A+1}} \eta_i \cdot x_{ijk'} \leq \epsilon \quad \forall (k, k') \in R \times R \quad (3.15)$$

La fonction objectif (3.13) est remplacée par l'équation (3.16) qui est la somme des critères T et C pondérée par les coefficients α_1 et α_3 .

$$\min \alpha_1 \cdot T + \alpha_3 \cdot C \quad (3.16)$$

Ce modèle ne comporte plus que deux objectifs, ce qui peut faciliter une démarche de résolution multi-objectif. Cependant, lors de la résolution, les contraintes sur l'équilibrage des tournées seront prépondérantes et donc prendront le pas sur les autres objectifs. Comme nous souhaitons travailler sur la priorité de chacun des critères, le premier modèle a été privilégié. Cependant, nous avons comparé les résultats obtenus avec les deux modèles sur des instances décrites dans le chapitre 4 section IV. Ces résultats sont présentés et commentés dans la partie 2.2 de cette même section.

Conclusion

Ce chapitre débute par la présentation de la méthodologie de modélisation que nous avons suivie pour réaliser un outil d'aide à la décision pour la construction de tournées de soins à domicile. Il est consacré à la première étape de construction du modèle de connaissance. Pour cela, nous avons proposé une modélisation sous forme de diagramme de classes du problème réel et une description des contraintes. Nous avons également réalisé un cahier des charges sous la forme d'une analyse des besoins et d'un diagramme des cas d'utilisation. Après avoir présenté les hypothèses que nous avons faites, nous décrivons le modèle de connaissance du problème traité. La spécification est ensuite réalisée sous la forme de deux modèles mathématiques. Le problème traité s'apparente au m-TSPTW qui est NP-complet. La résolution du modèle avec un solveur permet d'obtenir des solutions, présentées dans le chapitre 4, pour des problèmes de petites tailles (20 activités environ). Pour traiter des instances de taille plus importante, nous nous sommes dirigés vers des méthodes approchées de type métaheuristique. Le chapitre suivant concerne la construction de modèles d'action et la mise en œuvre qui correspondent aux étapes 2 et 3 de la méthodologie de modélisation.

Chapitre 4

Méthodes d'optimisation

Sommaire

Introduction	85
I Présentation des méthodes	85
1 Les métaheuristiques	85
1.1 Définition	85
1.2 Métaheuristiques à individu	86
1.2.1 Recherche locale	86
1.2.2 Descente stochastique	87
1.2.3 Recuit simulé	87
1.2.4 Recherche locale itérée	88
2 Méthodes hybrides à base de métaheuristiques	89
2.1 Couplage métaheuristique - optimisation	89
2.2 Couplage métaheuristique - modèle d'évaluation	90
II Proposition de méthodes pour la construction de tournées de soins, codage indirect	91
1 Codage d'une solution	91
2 Systèmes de voisinage	91
2.1 Insertion I_1	91
2.2 Échange E_1	91
3 Fonction objectif	92
4 Modèle d'affectation et d'évaluation	92
5 Couplage	94
5.1 Couplage à base de recuit simulé	95
5.2 Couplage à base de recherche locale itérée	95
III Proposition de méthodes pour la construction de tournées de soins, codage direct	98
1 Codage d'une solution	98
2 Systèmes de voisinage	99
2.1 Insertion I_2	99
2.2 Permutation P_2	100
3 Admissibilité des solutions construites	100
4 Fonction objectif	101
5 Modèle d'évaluation	101
6 Couplage	102
6.1 Couplage à base de recuit simulé	104
6.2 Couplage à base de recherche locale itérée	104
IV Mise en œuvre et résultats	107

1	Comparaison avec des résultats de la littérature	107
1.1	Présentation du problème et des instances de Bredström et Rönnqvist (2008) . .	107
1.2	Adaptation de nos méthodes pour la résolution de ces instances	109
1.3	Résultats	110
1.3.1	Instances de petite taille	111
1.3.2	Instances de taille moyenne et grande	116
2	Résultats obtenus pour notre problème	116
2.1	Adaptation des instances pour la résolution de notre problème	116
2.2	Comparaison des deux modèles mathématiques sur nos instances de petite taille	118
2.3	Comparaison entre la PLNE et notre approche sur les instances de petite taille .	119
2.4	Résultats sur les instances de taille moyenne et grande	126
Conclusion		126

Introduction

Le chapitre précédent correspond à la première étape de la méthodologie de modélisation que nous suivons. L'étape suivante, sujet de ce chapitre, consiste à réaliser un modèle d'action. Ce chapitre débute par la présentation des méthodes que nous utilisons. Vient ensuite notre proposition pour l'organisation des tournées de soins à domicile.

D'après Taillard (2002), de nombreux problèmes d'optimisation combinatoire peuvent s'exprimer sous la forme d'une recherche de permutations. À priori, tous ces problèmes pourraient utiliser les mêmes systèmes de voisinage puisque leurs solutions se présentent sous la même forme. Le problème que nous traitons est un problème qui peut s'exprimer sous la forme d'une recherche de permutations. Par conséquent, dans un premier temps, nous avons travaillé sur ce codage d'une solution, que nous appellerons indirect, qui est l'objet de la deuxième partie de ce chapitre. Dans un second temps, nous avons proposé un codage de solution spécifique, que nous appellerons direct, à notre problème décrit dans la troisième partie. Pour chacune de ces deux parties, nous définissons les systèmes de voisinage utilisés, la fonction objectif, le modèle de simulation associé ainsi que les couplages mis en œuvre.

Ce chapitre se termine par les résultats que nous avons obtenus. Tout d'abord, nous avons adapté nos méthodes de résolution à des instances de la littérature portant sur un problème proche du nôtre. Enfin, nous avons adapté ces mêmes instances à notre problème pour comparer les deux modèles mathématiques proposés dans le chapitre 3 et tester les méthodes que nous proposons dans ce chapitre.

I Présentation des méthodes

Selon Blum et Roli (2003), un problème d'optimisation combinatoire (S, f) peut être décrit de la façon suivante :

- un ensemble de variables $X = \{x_1, \dots, x_n\}$;
- des domaines de définition pour les variables D_1, \dots, D_n ;
- un ensemble de contraintes sur les variables ;
- une fonction objectif f à minimiser telle que $f : D_1 \times \dots \times D_n \rightarrow \mathbb{R}^+$.

Résoudre un problème d'optimisation combinatoire consiste à trouver une solution $s^* \in S$ qui minimise la fonction objectif f , c'est-à-dire que $\forall s \in S, f(s^*) \leq f(s)$ où S est l'ensemble des solutions admissibles. Une solution est dite admissible si elle vérifie toutes les contraintes du problème.

Nous débutons ce chapitre par quelques définitions de la littérature des méthodes que nous utilisons. Nous focalisons ensuite sur les métaheuristiques à individu avec, pour chaque méthode, le principe et un algorithme de principe.

1 Les métaheuristiques

1.1 Définition

Le terme métaheuristique est introduit par Glover (1986). Il dérive du grec *heuriskein* qui signifie « trouver » et du suffixe *meta* qui signifie « au-dessus ». L'auteur donne plusieurs définitions de la littérature, nous avons choisi d'en privilégier deux. La première définition que l'on retrouve dans le papier de Blum et Roli (2003) est issue du site internet www.metaheuristics.net (consultation en mars 2015).

A metaheuristic is a set of concepts that can be used to define heuristics methods that can be applied to a wide set of different problems. In other words, a metaheuristic can be seen as a general algorithmic framework which can be applied to different optimization problems with relatively few modifications to make them adapted to a specific problem.

Dans cette définition, une métaheuristique est définie comme un cadre pour la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire, facilement adaptable à un problème spécifique. Nous souhaitons utiliser ce cadre pour proposer des solutions d'organisation des tournées de soins à domicile. Osman et Laporte (1996) proposent la définition suivante :

A metaheuristic is formally defined as an iterative generation process which guides a subordinate heuristic by combining intelligently different concepts for exploring and exploiting the search space, learning strategies are used to structure information in order to find efficiently near-optimal solutions.

Cette définition complète la précédente en ajoutant la dimension itérative de la méthode et en apportant les concepts d'exploration et d'exploitation de l'espace de recherche ainsi que d'apprentissage.

- exploitation (ou intensification) : explorer les connaissances acquises pendant la recherche dans l'espoir de trouver de bonnes solutions ;
- exploration (ou diversification) : explorer de nouvelles zones de l'espace de recherche dans l'espoir d'en trouver des prometteuses.

À l'inverse des méthodes exactes, les métaheuristiques ne garantissent pas l'obtention d'une solution optimale, elles permettent généralement d'obtenir des solutions de bonne qualité en un temps raisonnable.

Différents critères ont été proposés pour classer les métaheuristiques selon Blum et Roli (2003). Après les avoir décrits, nous en choisirons un pour faire un rapide tour des métaheuristiques utilisées dans la littérature. Les métaheuristiques peuvent :

1. être inspirées par la nature ou non-inspirées par la nature ;
2. être basées individu (travail sur une solution) ou basées population (travail sur une population de solutions) ;
3. avoir une fonction objectif dynamique ou statique ;
4. utiliser un système de voisinage ou plusieurs systèmes de voisinage ;
5. être un algorithme avec historique ou sans historique.

Les auteurs privilégient la classification basée sur le nombre de solutions prises en compte (critère 2), nous allons donc suivre la même voie. Les travaux utilisant les métaheuristiques pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire sont nombreux et couvrent beaucoup de problèmes comme l'ordonnancement, la planification, les tournées de véhicules, le bin-packing, la coloration de graphe, ... Nous allons présenter (de manière non exhaustive) quelques méthodes à individu en donnant le principe général, un algorithme de principe et une référence historique. Ensuite, nous abordons l'hybridation de métaheuristiques puis le couplage entre une métaheuristique et un modèle de simulation. Les présentations et algorithmes des méthodes sont issus des travaux de l'équipe (Deroussi (2002) et Grangeon (2001)).

1.2 Métaheuristiques à individu

Les métaheuristiques à individu constituent une classe importante de métaheuristiques basées sur un système de voisinage. Un **système de voisinage** est une fonction $\mathcal{N} : S \rightarrow 2^S$ qui affecte à chaque élément $s \in S$ un ensemble de voisin $\mathcal{N}(s) \subseteq S$. $\mathcal{N}(s)$ est alors appelé le voisinage de s .

1.2.1 Recherche locale

La recherche locale, partant d'une solution, notée x_0 , consiste à choisir un voisin strictement meilleur. La solution devient alors la nouvelle solution de référence. Ce processus est répété tant que

la solution est améliorée. L'algorithme de principe est donné dans l'algorithme 2. $H(x)$ est l'évaluation de la solution x .

Algorithme 2 : Algorithme de principe - Recherche locale

```

 $x_0$  est une solution initiale
while la solution est améliorée do
    Choisir  $y \in \mathcal{N}(x) / H(y) \leq H(x)$ 
     $x \leftarrow y$ 
end

```

Le choix du voisin peut-être fait de différentes façons : choisir le meilleur améliorant (*Best improvement*), choisir le premier améliorant (*First improvement*) ou choisir parmi tous les améliorants un voisin au hasard (*Random improvement*).

1.2.2 Descente stochastique

La recherche locale, utilisant (*Best improvement*) ou (*Random improvement*), nécessite l'énumération de tous les voisins. Pour éviter ce travail coûteux, la descente stochastique consiste à choisir aléatoirement et uniformément, à chaque itération, une solution $y \in \mathcal{N}(x)$. Si la solution est meilleure, elle est acceptée comme nouvelle solution courante sinon elle est rejetée. L'algorithme s'arrête après un nombre défini d'itérations sans amélioration (*palier*). Le principe est donné dans l'algorithme 3.

Algorithme 3 : Algorithme de principe - Descente stochastique

```

 $x_0$  est une solution initiale
 $x \leftarrow x_0$ 
 $nbEchec \leftarrow 0$ 
while  $nbEchec < palier$  do
    Choisir aléatoirement et uniformément  $y \in \mathcal{N}(x)$ 
    if  $H(y) \leq H(x)$  then
         $x \leftarrow y$ 
         $nbEchec \leftarrow 0$ 
    else
         $nbEchec \leftarrow nbEchec + 1$ 
    end
end
Retourner  $x$ 

```

Pour déterminer le nombre d'itérations sans amélioration, appelé également palier, Fleury (1993) propose la formule 4.1.

$$palier \simeq \frac{\ln(1 - \rho)}{\ln\left(1 - \frac{1}{|\mathcal{N}|}\right)} \quad (4.1)$$

où ρ est la probabilité qu'il n'existe pas à la fin de la recherche locale de meilleure solution que la solution courante et $|\mathcal{N}|$ le nombre de voisins d'une solution en utilisant le voisinage \mathcal{N} . Pour $|\mathcal{N}|$ grand (ce qui est généralement le cas), on obtient :

$$palier \simeq -|\mathcal{N}| \ln(1 - \rho)$$

Fleury (1993) conseille de prendre $palier = 0,7 \cdot |\mathcal{N}|$, ce qui correspond à une probabilité $\rho = \frac{1}{2}$

1.2.3 Recuit simulé

Le recuit simulé, noté *SA* (*Simulated Annealing*), est une métaheuristique inspirée du principe physique qui consiste à alterner les phases de refroidissement et de réchauffement d'un métal pour

obtenir une structure stable à l'état solide. L'algorithme de principe est donné par l'algorithme 4. Le principe du recuit simulé, présenté par Kirkpatrick et al. (1983), est de guider les méthodes de recherche locale pour explorer plus efficacement l'espace des solutions. Pour éviter d'être piégé dans un minimum local, le recuit accepte des solutions qui dégradent la fonction objectif suivant une probabilité qui décroît pour tendre vers 0.

Algorithme 4 : Algorithme de principe - Recuit simulé inhomogène

```

 $T \leftarrow T_0$ 
 $x$  est une solution initiale
while le critère d'arrêt n'est pas atteint do
    Choisir aléatoirement et uniformément une solution  $y \in \mathcal{N}(x)$ 
    if  $H(y) \leq H(x)$  then
         $x \leftarrow y$ 
    else
         $x \leftarrow y$  avec la probabilité  $\exp\left(-\frac{H(y)-H(x)}{T}\right)$ 
    end
     $T \leftarrow \alpha.T$ 
end

```

Le recuit simulé est une métaheuristique relativement difficile à paramétrer. La température initiale T_0 est déterminée de telle manière que toutes les solutions soient acceptées dans les premières itérations. Elle est déterminée à l'aide de l'algorithme 5 où $\alpha = 0,8$ (Kirkpatrick et al. (1982)) et $\overline{\Delta H}^+$ l'augmentation moyenne de coût pour un certain nombre de transitions aléatoires. Une façon de gérer

Algorithme 5 : Calcul de T_0

```

 $x$  est une solution initiale
 $\Delta H \leftarrow 0$ 
for  $l \in \{1, \dots, L_{T_0}\}$  do
    Choisir uniformément et aléatoirement  $y \in \mathcal{N}(x)$ 
     $\Delta H \leftarrow \Delta H + \max(0, H(y) - H(x))$ 
     $x \leftarrow y$ 
end
 $\overline{\Delta H}^+ \leftarrow \frac{\Delta H}{L_{T_0}}$ 
 $x_0 \leftarrow 0.8$ 
 $T_0 \leftarrow \frac{H(y)^+}{\ln(x_0^{-1})}$ 

```

la température est d'utiliser, tout au long du déroulement de l'algorithme, une progression géométrique. Le facteur de décroissance de la température (noté α) est alors calculé de la manière suivante où k est le nombre d'itérations et T_f la température finale :

$$\alpha = \left(\frac{T_f}{T_0}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.2)$$

1.2.4 Recherche locale itérée

Le principe de la recherche locale itérée, notée *ILS* (*Iterative Local Search*), est de construire une suite de minima locaux à l'aide d'une recherche locale. L'algorithme de principe 6 a été proposé par Lourenço et al. (2003). Une itération se décompose en trois phases :

- la phase *Perturbation* permet à la recherche locale itérée de s'extraire des minima locaux en perturbant le minimum local courant x^* . Une nouvelle solution x' est ainsi obtenue

- la phase d'optimisation *LocalSearch* consiste à appliquer une recherche locale (déterministe ou stochastique) à la solution x' et ainsi obtenir un nouveau minimum local $x^{*'}.$
- la phase de choix *AcceptanceCriterion* permet de choisir le minimum local conservé pour l'itération suivante. La marche aléatoire *Random Walk*, notée *RW* consiste à choisir le minimum local de la dernière descente $x^{*'}.$ Cette solution privilégie la diversification à l'intensification. À l'inverse, le critère *Better*, noté *BW* consiste à conserver la solution record $x^*.$ Une solution intermédiaire consiste à faire le choix d'appliquer la perturbation sur le dernier minimum local ou le meilleur minimum local suivant une probabilité. Cette probabilité est définie par la dynamique de Metropolis. Ce critère est noté *Metropolis Walk (MW).* La méthode proposée est alors une hybridation entre une recherche locale itérée et un recuit simulé que nous définissons ensuite.

Algorithme 6 : Algorithme de principe - Recherche locale itérée

```

 $x_0 = \text{GenerateInitialSolution}$ 
 $x^* = \text{LocalSearch}(x_0)$ 
repeat
     $x' = \text{Perturbation}(x^*, \text{history})$ 
     $x^{*'} = \text{LocalSearch}(x')$ 
     $x^* = \text{AcceptanceCriterion}(x^{*'}, x', \text{history})$ 
until le critère d'arrêt est atteint

```

L'algorithme du kangourou, proposé par Fleury (1993) consiste à réaliser une recherche locale itérée dans laquelle la phase d'optimisation est une descente stochastique et non une recherche locale déterministe. Le critère de choix est *RW*. Au terme d'une descente, un « saut » est effectué afin d'explorer de nouvelles zones de l'espace de recherche. Le saut est réalisé, généralement, en appliquant plusieurs fois le système de voisinage de la descente en acceptant des transitions qui dégradent la solution. L'utilisation du critère *BW* dans le kangourou par Deroussi (2002) a permis d'améliorer encore l'efficacité de l'algorithme.

2 Méthodes hybrides à base de métaheuristiques

2.1 Couplage métaheuristique - optimisation

Pour accroître la qualité des solutions, une démarche d'hybridation de méthodes est apparue au début des années 2000. Le couplage métaheuristique /optimisation consiste à combiner une métaheuristique avec une méthode d'optimisation pour concevoir une méthode qui sait tirer bénéfice des avantages de chacune.

La figure 4.1 est traduite et extraite des travaux de Talbi (2002). Selon les travaux de l'auteur, les algorithmes hybrides améliorent les résultats connus sur des problèmes académiques pratiques.

L'auteur propose également une classification des métaheuristiques hybrides, résumée dans la figure 4.1. La classification est composée de deux niveaux :

- bas niveau ou haut niveau
- chaînée ou collaboratif

Dans une hybridation bas niveau, une fonction d'une métaheuristique est remplacée par une autre métaheuristique. Dans une hybridation haut niveau, les métaheuristiques sont indépendantes, Dans une hybridation chaînée, les métaheuristiques hybridées sont appliquées les unes après les autres séquentiellement. Les résultats obtenus en sortie de la première métaheuristique servent de donnée d'entrée à la suivante. Dans une hybridation collaborative différents agents coopèrent en parallèle, chaque agent effectue une recherche dans son propre sous-ensemble de solutions.

Selon cette classification, le critère d'acceptation *MW* défini dans la partie précédente est une hybridation bas niveau, le choix de la solution à perturber est fait suivant le principe de recuit simulé, et chaînée, le résultat du recuit simulé permet de déterminer la solution initiale de la recherche locale suivante.

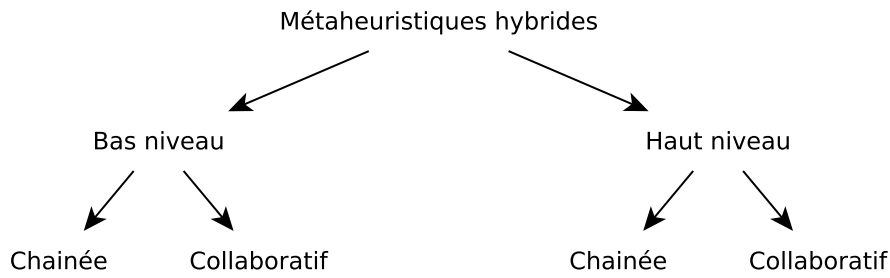


Figure 4.1 – Classification des métaheuristiques hybrides, extrait et traduit de Talbi (2002)

2.2 Couplage métaheuristique - modèle d'évaluation

Un problème peut être soumis à une double complexité algorithmique et structurelle (cf. figure 4.2) comme décrit par Norre (2005) :

- une complexité structurelle ou fonctionnelle qui se traduit par la difficulté d'évaluer de manière simple le ou les critères de performance,
- une complexité algorithmique, qui par abus de langage, désigne la complexité des problèmes d'optimisation combinatoire.

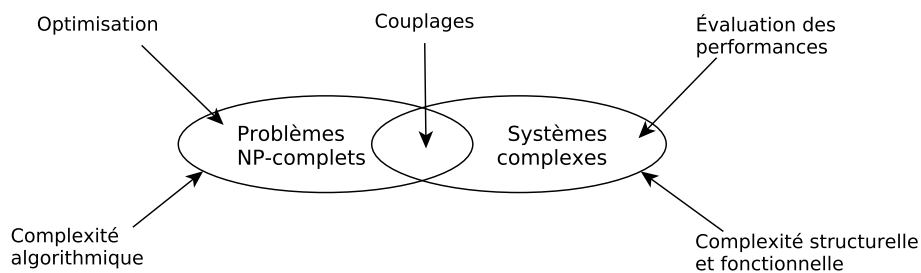


Figure 4.2 – Double complexité - Norre (2005)

La résolution des problèmes liés à la double complexité repose sur le couplage entre les méthodes d'optimisation (comme les métaheuristiques) et les modèles d'évaluation des performances (modèle de simulation déterministe ou stochastique; modèle markovien). La figure 4.3 décrit le fonctionnement d'un couplage, le module 1 désigne une méthode d'optimisation et le module 2 un modèle d'évaluation des performances. Le principe peut être résumé par le processus itératif suivant :

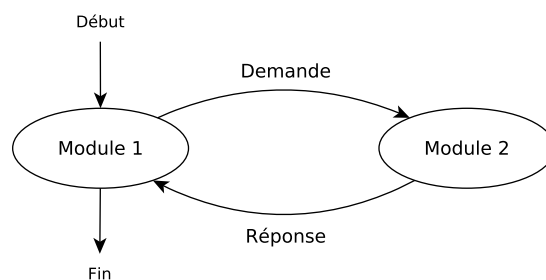


Figure 4.3 – Principe du couplage - Norre (2005)

- le module 1 envoie une demande au module 2,
- le module 2 retourne une réponse au module 1,
- en fonction de la réponse du module 2, le module 1 prend une décision et formule une nouvelle demande au module 1.

II Proposition de méthodes pour la construction de tournées de soins, codage indirect

Dans cette partie, nous proposons le premier couplage métaheuristique - modèle de simulation basé sur un codage indirect de solution. Nous débutons justement par le codage d'une solution et des systèmes de voisinage utilisées. Nous abordons ensuite le modèle de simulation que nous avons réalisé puis la proposition d'algorithmes pour la construction des tournées de soins.

1 Codage d'une solution

Une solution de notre problème d'optimisation est représentée par une permutation de n_A activités. Ce codage nécessite ensuite l'application d'une heuristique, décrite dans la partie suivante, pour obtenir une solution à notre problème. La permutation est notée $\sigma = (\sigma_i)_A$ où σ_i est la i^{eme} activité à affecter.

2 Systèmes de voisinage

Deux systèmes de voisinage, décrits également dans Taillard (2002), ont été testés : insertion, noté I_1 , et échange, noté E_1 .

2.1 Insertion I_1

Le système de voisinage insertion consiste à déplacer une activité, choisie aléatoirement et uniformément, à une position, choisie aléatoirement et uniformément, différente dans la permutation ξ .

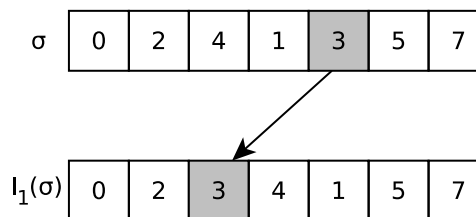
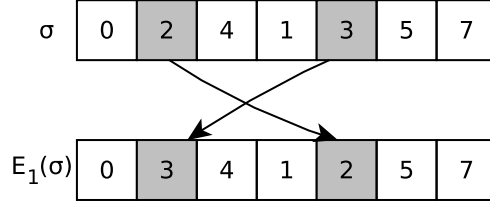


Figure 4.4 – Voisinage insertion I_1

2.2 Échange E_1

Le système de voisinage échange consiste à échanger la position de deux activités choisies uniformément et aléatoirement dans la permutation ξ .

Figure 4.5 – Voisinage échange E_1

3 Fonction objectif

La fonction objectif est la somme pondérée des trois critères définis dans le chapitre 3 section 2 à laquelle sont ajoutées des pénalités lorsque les dates de début des activités ne respectent pas les fenêtres de temps. Ces pénalités sont calculées de la manière suivante (équation (4.3))

$$pen = \sum_{i \in A} \left[(z_i - e_i)^2 \cdot \chi_{\{z_i - e_i > 0\}} \right] \quad (4.3)$$

où χ est la fonction caractéristique de l'ensemble $\{i/z_i - e_i > 0\}$. La fonction objectif est comme suit :

$$\text{Minimiser } \alpha_1.T + \alpha_2.C + \alpha_3.\delta + \alpha_4.pen \quad (4.4)$$

où $\alpha_i, i \in \{1, \dots, 4\}$ sont des coefficients de pondération. Les coefficients sont choisis de telle façon que les pénalités sont prioritaires par rapport aux autres critères. Le principe est identique au choix des coefficients de la fonction objectif du modèle mathématique en ajoutant les pénalités (cf. chapitre 3 section 2.2.2).

4 Modèle d'affectation et d'évaluation

Ce modèle est un modèle de simulation à événements discrets avec une approche par événements et une règle de gestion. Il permet d'affecter les activités aux ressources compatibles suivant une permutation σ et une règle de gestion choisie, de calculer les dates de début des activités et évaluer les critères de performance. Deux règles de gestion ont été testées.

- La première consiste à affecter l'activité à la ou les ressources compatibles qui minimisent la date de fin de l'activité. Il est calculé pour l'activité σ_i avec la formule de l'équation (4.5).
- La seconde consiste à affecter l'activité à la ou les ressources compatibles qui minimisent les temps de transport (analogie avec l'heuristique du plus proche voisin). Il est calculé pour l'activité σ_i avec la formule de l'équation (4.6).

Pour les deux critères, en cas d'égalité entre plusieurs ressources, nous privilégions la ressource qui a le degré de compatibilité le plus élevé avec l'activité à réaliser. Seules les dates de début au plus tôt sont prises en compte dans le modèle de simulation, les dates de début au plus tard sont intégrées dans la fonction objectif.

Les variables $z_i, \forall i \in A$ sont calculées. Les notations sont les mêmes que dans le modèle mathématique, elles sont rappelées ici :

nb_i Nombre de ressources requises pour réaliser l'activité $i \in A$

τ_i Durée de l'activité $i \in A$

b_i Date de début au plus tôt de l'activité $i \in A$

D_{ij} Temps de transport entre l'activité $i \in \{0, \dots, n_A\}$ et l'activité $j \in \{1, \dots, n_{A+1}\}$

C_{ik} Degré de compatibilité entre l'activité $i \in A$ et la ressource $k \in R$

Les variables locales utilisées dans cet algorithme sont :

- $position(n_R)$: vecteur d'entiers qui définit l'activité courante réalisée par chaque ressource ;
- $date_debut(n_R)$: vecteur de réels des dates de début de l'activité courante par chaque ressource ;
- K_{σ_i} : ensemble des ressources affectées à l'activité σ_i ;
- $crit(n_R)$: vecteur de réels, chaque élément représente l'évaluation du critère choisi pour une ressource ;
- i : compteur qui permet de parcourir la permutation σ ;
- cpt : compteur.

$$crit(k) = \max\{z_{position(k)} + \tau_{position(k)} + D_{position(k),\sigma_i}; b_i\} + \tau_{\sigma_i} \quad (4.5)$$

$$crit(k) = D_{position(k),\sigma_i} \quad (4.6)$$

$$date_debut(k) = \max\{z_{position(k)} + \tau_{position(k)} + D_{position(k),\sigma_i}; b_i\} \quad (4.7)$$

Algorithme 7 : Modèle de simulation avec une règle de gestion

```

position(k) = 0,  $\forall k \in R$ 
 $z_0 = b_0$ 
begin
  for i = 1 to  $n_A$  do
     $crit_k = 0, \forall k \in R$ 
     $date\_debut(k) = 0, \forall k \in R$ 
     $K_{\sigma_i} = \emptyset$ 
    for k  $\in R$  do
      if  $C_{\sigma_i, k} > 0$  then
         $crit(k) = \text{évaluation du critère choisi pour l'activité courante } (\sigma_i) \text{ réalisée par la}$ 
         $\text{ressource } k \text{ (équation (4.5) ou (4.6))}$ 
         $date\_debut(k) = \text{date de début de l'activité courante } (\sigma_i) \text{ réalisée par la ressource}$ 
         $k \text{ (4.7)}$ 
      else
         $crit(k) = \infty;$ 
      end
    end
     $cpt \leftarrow 0$ 
    while  $cpt < nb_i$  do
       $K = \{k' / crit(k') = \min_{k \in R} crit(k)\}$ 
      if  $|K| = 1$  then
        Affecter l'activité  $\sigma_i$  à la ressource  $k' \in K$ 
         $K_{\sigma_i} = K_{\sigma_i} \cup k'$ 
         $crit(k') = \infty$ 
      else
        // privilégier la ressource avec le plus haut niveau de compatibilité
        Affecter l'activité  $\sigma_i$  à la ressource  $k'' / C_{\sigma_i k''} = \max_{k' \in K} \{C_{\sigma_i k'}\}$ 
         $K_{\sigma_i} = K_{\sigma_i} \cup k''$ 
         $crit(k'') = \infty$ 
      end
       $cpt = cpt + 1$ 
    end
     $z_i = \max_{k \in K_{\sigma_i}} \{date\_debut(k)\}$ 
     $position(k) = \sigma_i, \forall k \in K_{\sigma_i}$ 
  end
end

```

5 Couplage

Une métaheuristique propose une solution c'est-à-dire une permutation que nous avons noté σ . Cette permutation sert d'entrée au modèle de simulation. Ce modèle affecte les activités aux ressources, calcule les dates de début des activités et évalue les critères de performance. Ces informations sont renvoyées à la métaheuristique qui décide d'accepter ou de refuser la solution. Le couplage est décrit dans la figure 4.6. Suivant la définition de la partie 2.2, ceci est un couplage entre une métaheuristique et un modèle de simulation qui construit et évalue une solution. Comme le modèle de simulation affecte les activités dans l'ordre défini par σ , cette approche permet de s'affranchir des problèmes d'apparition de circuits dans une solution lors de l'application de systèmes de voisinage qui apparaissent avec le codage direct que nous présentons ensuite.

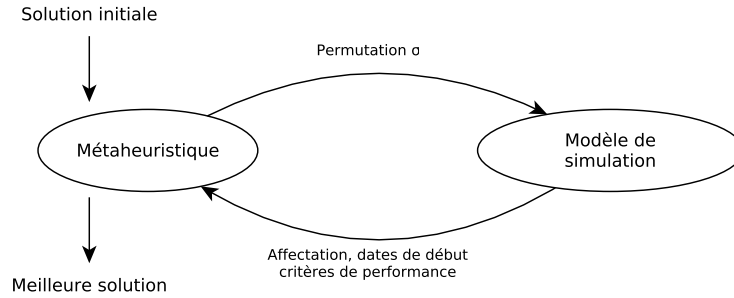


Figure 4.6 – Couplage métaheuristique - heuristique d'affectation et d'évaluation

La solution initiale est une permutation construite aléatoirement

5.1 Couplage à base de recuit simulé

L'algorithme 8 décrit le fonctionnement de notre premier couplage. Nous notons H_x l'évaluation de la solution x . $simu(x)$ appelle le modèle de simulation présenté dans l'algorithme 7 pour construire les tournées des ressources et évaluer les critères de performance. $\mathcal{N}(x)$ est un voisin de la solution x .

Il est défini comme suit : $\mathcal{N}(x) = \begin{cases} \text{Insertion } I_1(x) & \text{avec une probabilité } \rho_1 \\ \text{Échange } E_1(x) & \text{avec une probabilité } (1 - \rho_1) \end{cases}$

Après des tests sur différentes instances avec $\rho_1 = 1, \rho_1 = 0.67; \rho_1 = 0.5, \rho_1 = 0.33$ et $\rho_1 = 0$, il est apparu que l'échange E_1 perturbe trop la solution. Les résultats les meilleurs ont été obtenus avec $\rho_1 = 1$. Par conséquent, nous ne reporterons que les résultats avec I_1 .

Algorithme 8 : Premier couplage à base de recuit simulé

$x \leftarrow$ solution initiale

$H_x \leftarrow simu(x)$

Initialisation de la température $T \leftarrow T_0$

Calcul du facteur de décroissance géométrique de la température $\alpha = \left(\frac{T_f}{T_0} \right)^{\frac{1}{nbIter}}$

for $iter \leftarrow 1$ to $nbIter$ **do**

 choisir $y \in \mathcal{N}(x)$

$H_y \leftarrow simu(y)$

if $rnd() < e^{-\frac{H_y - H_x}{T}}$ **then**

$x \leftarrow y$

end

$T \leftarrow \alpha.T$

end

5.2 Couplage à base de recherche locale itérée

L'algorithme de Lourenço et al. (2003) a été présenté dans la partie 1.2.4. Les différents éléments nécessaires à l'application de l'algorithme sont précisés :

- *GenerateInitialSolution* : la solution initiale est construite de la même façon que pour le recuit simulé
- *LocalSearch* : les systèmes de voisinage utilisés dans la recherche locale sont l'insertion I_1 et l'échange E_1 (phase d'intensification) ;

- *Perturbation* : la perturbation est effectuée en appliquant nb fois le voisinage échange E_1 (phase de diversification).

L'algorithme 9 décrit le fonctionnement de ce premier couplage. Les systèmes de voisinage utilisés sont également I_1 et E_1 . Comme pour le recuit simulé, nous avons testé différentes probabilités (0, 0.33, 0.5, 0.67 et 1) pour le choix des voisinages I_1 et E_1 . Les conclusions sont identiques, nous privilégions donc I_1 dans la phase *LocalSearch*. En revanche, le système de voisinage E_2 est utilisé dans la phase de diversification.

Nous avons testé trois critères d'acceptation. Le premier nommé *Random Walk (RW)* dans les travaux de Lourenço et al. (2003) consiste à appliquer la perturbation au minimum local de la dernière recherche locale. La diversification est alors importante.

Le second nommé *Better (BW)* dans ces mêmes travaux consiste à appliquer la perturbation au meilleur minimum local. Dans ce cas, l'intensification est privilégiée.

Enfin, nous utilisons également une solution intermédiaire que nous avons notée *MW*. La température initiale a été fixée à 750 après différents tests sur des instances de petite taille. Le facteur de décroissant géométrique est calculé grâce à la formule 4.2. Pour déterminer le nombre d'itérations, qui correspond aux nombre de descentes, nous avons fait des résolutions avec le critère d'acceptation *BW*. Ainsi le facteur de décroissance α peut être calculé.

Le nombre d'itérations ($nbIter$) et le nombre d'application du voisinage Échange lors de la phase de diversification (nb) ont été déterminés expérimentalement pour chaque taille des instances traitées. Le palier ($nbEchec$) est défini à l'aide de la formule proposée par Fleury (1993) qui est rappelé dans la première partie de ce chapitre. Nous préciserons ces valeurs dans la partie résultat de ce chapitre.

Algorithme 9 : Premier couplage à base de recherche locale itérée

```

 $x \leftarrow$  solution initiale
 $x_{rec} \leftarrow x$ 
 $H_x \leftarrow \text{simu}(x)$ 
 $H_{x_{rec}} \leftarrow H_x$ 
Initialisation de la température  $T \leftarrow T_0$  et calcul de  $\alpha$ 
for  $i \leftarrow 1$  to  $nbIter$  do
  // Recherche locale
   $nbEchec \leftarrow 0$ 
  while  $nbEchec < palier$  do
    choisir  $y \in \mathcal{N}(x)$ 
     $H(y) \leftarrow \text{simu}(y)$ 
    if  $H_y \leq H_x$  then
       $x \leftarrow y$ 
       $H_x \leftarrow H_y$ 
       $nbEchec \leftarrow 0$ 
    else
       $nbEchec \leftarrow nbEchec + 1$ 
    end
     $i \leftarrow i + 1$ 
    if  $H_x \leq H_{x_{rec}}$  then
       $x_{rec} \leftarrow x$ 
    end
  end
  // Diversification
  switch  $AcceptanceCriterion$  do
    case  $RW$ 
      // Random Walk (RW)
       $\emptyset$ 
    end
    case  $BW$ 
      // Better (BW)
       $x \leftarrow x_{rec}$ 
       $H_x \leftarrow H_{x_{rec}}$ 
    end
    case  $MW$ 
      // Metropolis Walk (MW)
      if  $\text{rnd}() < e^{-\frac{H_x - H_{x_{rec}}}{T}}$  then
         $x \leftarrow x_{rec}$ 
         $H_x \leftarrow H_{x_{rec}}$ 
      end
       $T \leftarrow \alpha.T$ 
    end
  endsw
  for  $j \leftarrow 1$  to  $nb$  do
    Choisir aléatoirement et uniformément  $y \in E_2(x)$ 
  end
end

```

III Proposition de méthodes pour la construction de tournées de soins, codage direct

Le second couplage que nous proposons est basé sur un codage direct de la solution. Dans cette partie, nous présentons le codage avec les systèmes de voisinage associées puis le modèle de simulation réalisé. Nous terminons par le couplage entre les métaheuristiques (recuit simulé et recherche locale itérée) et le modèle de simulation.

1 Codage d'une solution

Une solution de notre problème d'optimisation est un ensemble de tournées, chaque tournée étant réalisée par une ressource. Une tournée est une liste ordonnée d'activités débutant et se terminant au dépôt. Une solution est codée par une matrice $(\phi_{ik})_{A \times R}$ où ϕ_{ik} est la i^{eme} activité réalisée par la ressource k . Ainsi, chaque colonne de la matrice ϕ est la tournée d'une ressource. Elle peut être représentée sous la forme d'un graphe. Une solution de l'exemple qui suit est représentée sur la figure 4.7. Les activités 0 et 11 sont des activités fictives qui représentent le début et la fin des tournées.

L'exemple est composé de trois ressources et de dix activités. Toutes les activités nécessitent une ressource à l'exception des activités 3, 5 et 9 qui requièrent la présence simultanée de deux ressources pour être réalisées. Les ressources r_1 et r_2 sont du type 1 et la ressource r_3 du type 2. Les activités 1, 5, 6 et 8 doivent être réalisées par une ressource de type 1, les activités 2 et 7 par une ressource de type 2. Les autres activités (3, 4 et 9) peuvent être réalisées par les deux types de ressources. Ces informations sont résumées dans le tableau 4.1.

activité	ressource		
	nb requis	type 1	type 2
1	1	✓	
2	1		✓
3	2	✓	✓
4	1	✓	✓
5	2	✓	
6	1	✓	
7	1		✓
8	1	✓	
9	2	✓	✓
10	1	✓	

Tableau 4.1 – Résumé des données de l'exemple - organisation des tournées de soins

Suivant ces données et la prise en compte de la préférence des patients, on obtient la matrice de

compatibilité C_{ik} de la forme :

$$C_{ik} = \begin{pmatrix} 0,8 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0,5 & 0,6 & 0,3 \\ 0,7 & 0,5 & 0,4 \\ 0,6 & 0,7 & 0 \\ 0,4 & 0,7 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0,6 & 0,5 & 0 \\ 0,3 & 0,8 & 0,5 \\ 0,9 & 0,4 & 0 \end{pmatrix}$$

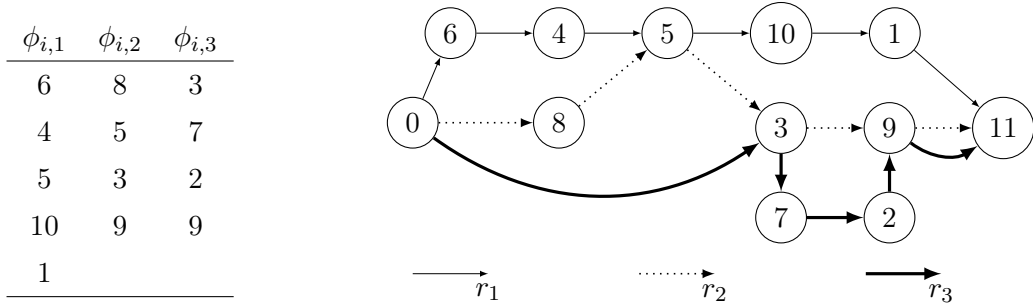


Figure 4.7 – Exemple - Codage et représentation d'une solution

Pour toutes les ressources $k \in R$, $\phi_{0,k} = 0$. La ressource r_1 part du dépôt pour réaliser l'activité 6 ($\phi_{1,1} = 6$), puis l'activité 4 ($\phi_{2,1} = 4$). La ressource r_2 part également du dépôt pour réaliser l'activité 8 ($\phi_{1,2} = 8$) puis les ressources r_1 et r_2 se rejoignent pour réaliser l'activité 5 ($\phi_{3,1} = \phi_{2,2} = 5$). La ressource r_3 débute sa tournée par l'activité 3 ($\phi_{1,3} = 3$) qu'elle réalise avec la ressource r_2 ($\phi_{3,2} = 3$). Ensuite, la ressource r_3 va réaliser les activités 7 ($\phi_{2,3} = 7$) et 2 ($\phi_{3,3} = 2$) avant de retrouver la ressource r_2 pour réaliser l'activité 9 ($\phi_{4,3} = \phi_{4,2} = 9$) puis retourner au dépôt. Après l'activité 5, la ressource r_1 effectue les activités 10 ($\phi_{4,1} = 10$) puis 1 ($\phi_{5,1} = 1$) et retourne au dépôt.

2 Systèmes de voisinage

Liu et al. (2010) ont présenté des systèmes de voisinages pour les problèmes de m-TSP. Nous les avons adaptés afin de prendre en compte la compatibilité entre activités et ressources. L'insertion est notée I_2 et la permutation P_2 .

2.1 Insertion I_2

Le voisinage insertion I_2 , décrit dans l'algorithme 10, consiste à déplacer une activité à une position différente en respectant la compatibilité entre ressource et activité sans tenir compte des fenêtres de temps. Les mouvements autorisés sont de deux types :

- les mouvements intra-tournée : une activité est insérée à une place différente dans la tournée de la même ressource, cf. figure 4.8 a.
- les mouvements inter-tournées : une activité est insérée dans la tournée d'une autre ressource compatible avec l'activité déplacée, cf. figure 4.8 b.

Sur la figure 4.8 b., la ressource 3 est grisée car l'activité 10 ne peut pas être insérée dans la tournée de r_3 car $C_{10,3} = 0$ (cf. (4.8)).

Algorithme 10 : Voisinage insertion I_2

1. choisir aléatoirement et uniformément une ressource k_1
 2. choisir aléatoirement et uniformément une activité i réalisée par la ressource k_1
 3. choisir aléatoirement et uniformément une ressource k_2 compatible avec l'activité i
 4. choisir aléatoirement et uniformément une position b dans la liste ordonnée d'activités réalisées par la ressource k_2
 5. insérer l'activité i à la position b dans la liste ordonnée d'activités réalisées par la ressource k_2
-

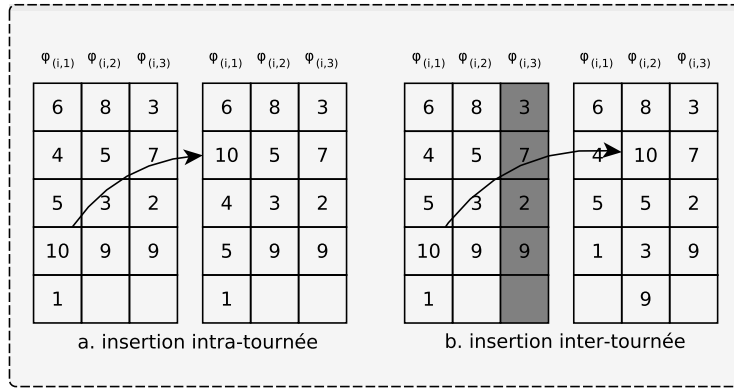


Figure 4.8 – Voisinage insertion I_2

2.2 Permutation P_2

Le voisinage permutation P_2 , décrit dans l'algorithme 11, consiste à échanger les positions de deux activités en respectant la compatibilité entre ressource et activité sans tenir compte des fenêtres de temps. De la même façon que pour le voisinage insertion, nous autorisons des mouvements intra-tournée (figure 4.9a.) et inter-tournées (figure 4.9b.).

Algorithme 11 : Voisinage permutation P_2

1. choisir aléatoirement et uniformément une ressource k_1
 2. choisir aléatoirement et uniformément une activité i réalisée par la ressource k_1
 3. choisir aléatoirement et uniformément une ressource k_2 compatible avec l'activité i , la ressource k_2 doit effectuer au moins une activité compatible avec la ressource k_1
 4. choisir aléatoirement et uniformément une activité j compatible avec la ressource k_1 réalisée par la ressource k_2
 5. échanger les activités i et j
-

3 Admissibilité des solutions construites

Lors de l'application d'un système de voisinage (aussi bien l'insertion que la permutation), la présence d'activités synchronisées peut entraîner la formation d'un circuit dans le graphe représentant une solution. Dans ce cas, la solution ne sera pas réalisable. En reprenant l'exemple du tableau 4.1 et en appliquant le voisinage permutation à l'activité en position 2 de la ressource r_1 et l'activité en position 1 de la ressource r_3 . Ce mouvement donne une solution qui respecte les compatibilités entre

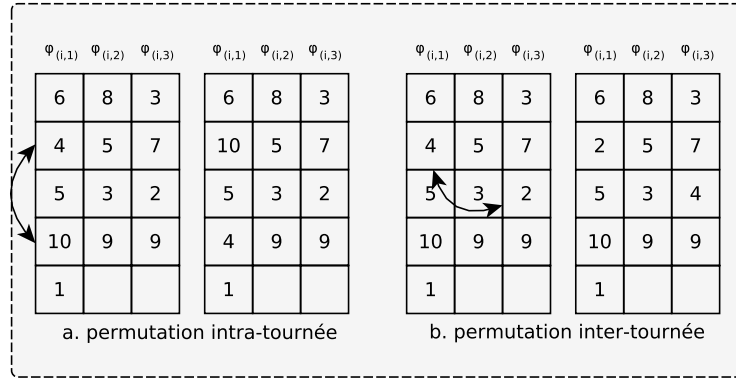
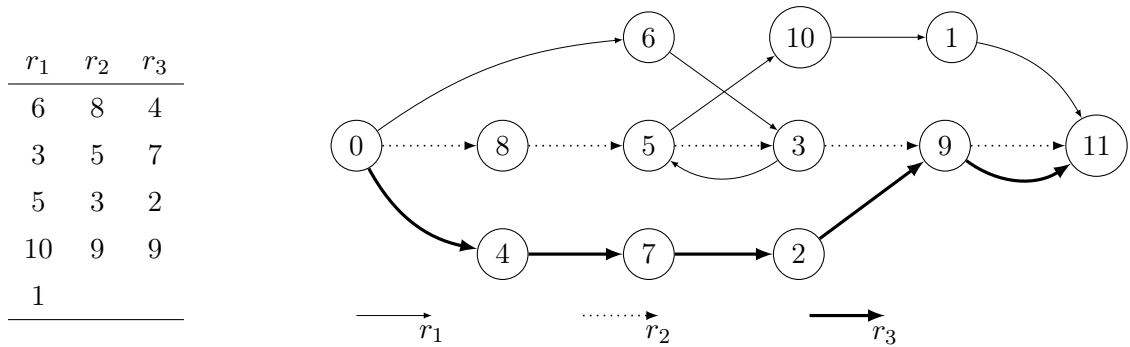
Figure 4.9 – Voisinage permutation P_2 

Figure 4.10 – Solution avec un circuit

ressource et activité car $C_{2,1}$ et $C_{1,3}$ sont strictement positifs. Cependant, un circuit est créé entre les activités 3 et 5 pour les ressources r_1 et r_2 .

Par conséquent, suite à l'application d'un système de voisinage, il faut vérifier la faisabilité de la solution. Pour limiter les temps de calcul, nous avons intégré dans un modèle de simulation la détection de solutions non réalisables tout en calculant les dates de début des activités et les critères de performance. Il est présenté dans la partie suivante.

4 Fonction objectif

Une solution est évaluée suivant la même fonction objectif que pour le premier couplage (cf. (4.4)).

5 Modèle d'évaluation

Dans ce mémoire, les contraintes de synchronisation concernent au maximum deux ressources. Cependant, l'algorithme du modèle de simulation permet de prendre en compte un nombre quelconque de ressources synchronisées. C'est un modèle de simulation à événements discrets avec une approche par événements. Le modèle évolue chaque fois qu'un élément change d'état. L'algorithme 12 décrit le fonctionnement du modèle.

La date de réalisation d'une activité est calculée lorsque le nombre requis de ressources est affecté à l'activité. Ensuite, la (ou les) ressource(s) sont libérée(s) puis affectée(s) à l'activité suivante de leurs tournées respectives. La simulation est terminée lorsqu'aucune date de début d'activité ne peut être calculée. Deux cas se posent alors :

- toutes les activités ont une date de début, la solution est réalisable,

- certaines activités n'ont pas de date de début, la solution n'est pas réalisable car elle contient un cycle.

La date de début d'une activité est la valeur maximale entre la date de début au plus tôt de l'activité (b_i) et les dates d'arrivée de la (ou les) ressource(s) affectée(s). Les notations sont les mêmes que dans le modèle mathématique, elles sont rappelées ici :

nb_i Nombre de ressources requises pour réaliser l'activité $i \in A$

τ_i Durée de l'activité $i \in A$

b_i Date de début au plus tôt de l'activité $i \in A$

D_{ij} Temps de transport entre l'activité $i \in \{0, \dots, n_A\}$ et l'activité $j \in \{1, \dots, n_{A+1}\}$

C_{ik} Degré de compatibilité entre l'activité $i \in A$ et la ressource $k \in R$

Les variables calculées sont : $z_i, \forall i \in A$ la date de début de l'activité i . Les variables locales de l'algorithme sont :

- $nbDispo(n_A)$: vecteur d'entiers pour le suivi du nombre de ressources disponibles pour réaliser chaque activité ;
- $position(n_R)$: vecteur d'entiers qui permet d'identifier la position de chaque ressource dans sa tournée ;
- $compteurActivite$: variable entière qui évolue au cours de la simulation pour déterminer le nombre d'activités dont la date de début a été calculée ;
- $continu$: variable booléenne qui à chaque itération permet de définir s'il reste une ou plusieurs activités dont on peut calculer la date de début ;
- $ressourceUtilise(n_R)$: vecteur de booléens qui définit à chaque itération les ressources qui sont libérées et affectées à l'activité suivante.

Pour alléger l'algorithme, les notations suivantes sont utilisées :

- K_i : ensemble des ressources qui réalisent l'activité i ;
- $\rho_k = \phi(position(k) - 1, k)$: l'activité qui précède l'activité courante dans la tournée de la ressource k .

6 Couplage

La métaheuristique propose des solutions qui sont évaluées par le modèle de simulation. Suivant les informations renvoyées par le modèle de simulation, la métaheuristique décide d'accepter ou rejeter la solution. Suivant la définition de la partie 2.2, notre approche est un couplage entre une métaheuristique (méthode 1) et un modèle de simulation (méthode 2) comme le montre la figure 4.11. La solution initiale

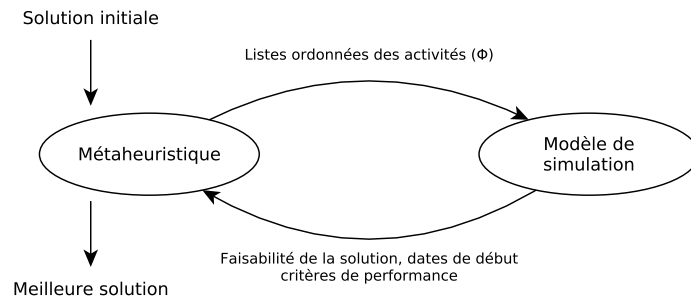


Figure 4.11 – Couplage métaheuristique - simulation

est construite en triant les activités suivant l'ordre croissant des dates de début au plus tard. On obtient alors une permutation. L'application du modèle de simulation du premier couplage (algorithme

Algorithm 12 : Algorithm de principe - Modèle de simulation

```

begin
   $position(k) \leftarrow 1, \forall k \in R$ 
   $nbDispo(i) \leftarrow 0, \forall i \in A$ 
   $compteurActivite \leftarrow 0$ 
   $continu \leftarrow true$ 
  for  $k \leftarrow 1$  to  $n_R$  do
     $nbDispo(\phi(position(k), k)) \leftarrow nbDispo(\phi(position(k), k)) + 1$ 
  end
  while  $continu = true$  &  $compteurActivite \leq n_A$  do
     $continu \leftarrow false$ 
    for  $i \in A / nbDispo(i) = nb_i$  do
       $z_i \leftarrow \max \left( b_i, \max_{k' \in K_i} (z_{\rho_{k'}} + \tau_{\rho_{k'}} + D_{\rho_{k'}, i}) \right)$ 
       $compteurActivite \leftarrow compteurActivite + 1$ 
       $position(k) \leftarrow position(k) + 1, \forall k \in K_i$ 
       $nbDispo(\phi(position(k), k)) \leftarrow nbDispo(\phi(position(k), k)) + 1, \forall k \in K_i$ 
      if  $nbDispo(\phi(position(k)), k) = nb_{\phi(position(k)), k}$  then
         $continu \leftarrow true$ 
      end
    end
  end
  if  $compteurActivite = n_A$  then
    //la solution est réalisable
    retourner l'évaluation des critères de performance
  else
    //la solution n'est pas réalisable
    retourner  $\infty$ 
  end
end

```

7) permet de répartir les activités entre les ressources. La solution construite respecte les contraintes de compatibilité, de synchronisation et de date de début au plus tôt. En revanche, elle ne respecte pas les dates de début au plus tard.

6.1 Couplage à base de recuit simulé

Pour ce second couplage, $\mathcal{N}(x)$ est un voisin de la solution x . Il est défini comme suit : $\mathcal{N}(x) = \begin{cases} I_2(x) & \text{avec une probabilité } \rho_2 \\ P_2(x) & \text{avec une probabilité } (1 - \rho_2) \end{cases}$

Nous avons réalisé les mêmes tests que pour le premier couplage pour déterminer ρ_2 et la conclusion est identique. Par conséquent, nous présenterons les résultats pour $\rho_2 = 1$. *simu*(x) appelle le modèle de simulation décrit dans l'algorithme 12 pour calculer les dates de début des activités, vérifier la faisabilité de la solution et évaluer les critères de performance. Si la solution n'est pas réalisable, les critères prennent la valeur ∞ .

Algorithme 13 : Second couplage à base de recuit simulé

```

 $x \leftarrow$  solution initiale
 $H_x \leftarrow \text{simu}(x)$ 
Initialisation de la température  $T \leftarrow T_0$ 

Calcul du facteur de décroissance géométrique de la température  $\alpha = \left(\frac{T_f}{T_0}\right)^{\frac{1}{nbIter}}$ 
for  $iter \leftarrow 1$  to  $nbIter$  do
    choisir  $y \in \mathcal{N}(x)$ 
     $H_y \leftarrow \text{simu}(y)$ 
    if  $\text{rnd}() < e^{-\frac{H_y - H_x}{T}}$  then
        |  $x \leftarrow y$ 
    end
     $T \leftarrow \alpha.T$ 
end

```

6.2 Couplage à base de recherche locale itérée

L'algorithme de Lourenço et al. (2003) a été présenté dans la partie 1.2.4. Les différents éléments nécessaires à l'application de l'algorithme sont précisés :

- *GenerateInitialSolution* : la solution initiale est construite de la même façon que pour le recuit simulé
- *LocalSearch* : les systèmes de voisinage utilisés dans la recherche locale sont l'insertion intra et inter tournée (I_2) et la permutation intra et inter tournée (P_2) ;
- *Perturbation* : la perturbation est effectuée en appliquant plusieurs fois le voisinage permutation intra ou inter tournée (phase de diversification).

Comme pour le recuit simulé, nous avons testé différentes probabilités (0, 0.33, 0.5, 0.67 et 1) pour le choix des voisinages I_2 et P_2 . Les conclusions sont identiques, ainsi la probabilité de choisir le système de voisinage I_2 est égale à 1 dans la phase *LocalSearch*. En revanche, le système de voisinage P_2 est utilisé dans la phase de diversification.

Les critères d'acceptation testés sont identiques à ceux du premier couplage : *Random Walk* (RW), *Better* (BW) et *Metropolis Walk* (MW). Dans la phase de diversification, nous appliquons nb fois le système de voisinage P_2 . Comme nous l'avons vu précédemment, cela peut engendrer des solutions qui ne sont pas réalisables à cause de la présence de circuit dans la solution. C'est pour cela que nous

Algorithme 14 : Second couplage basé sur la recherche locale itérée

```

 $x \leftarrow$  solution initiale
 $H_x \leftarrow \text{simu}(x)$ 
Initialisation de la température  $T \leftarrow T_0$  et calcul de  $\alpha$ 
for  $i \leftarrow 1$  to  $\text{nbIter}$  do
   $\text{nbEchec} \leftarrow 0$ 
  while  $\text{nbEchec} < \text{palier}$  do
    choisir  $y \in \mathcal{N}(x)$ 
     $H_y \leftarrow \text{simu}(y)$ 
    if  $H_y \leq H_x$  then
       $x \leftarrow y$ 
       $H_x \leftarrow H_y$ 
       $\text{nbEchec} \leftarrow 0$ 
    else
       $\text{nbEchec} \leftarrow \text{nbEchec} + 1$ 
    end
     $i \leftarrow i + 1$ 
  end
  if  $H_x < H_{x_{rec}}$  then
     $x_{rec} \leftarrow x$ 
     $H_{x_{rec}} \leftarrow H_x$ 
  end
  switch  $\text{AcceptanceCriterion}$  do
    case  $RW$ 
      // Random Walk (RW)
       $\emptyset$ 
    end
    case  $BW$ 
      // Better (BW)
       $x \leftarrow x_{rec}$ 
       $H_x \leftarrow H_{x_{rec}}$ 
    end
    case  $MW$ 
      // Metropolis Walk (MW)
      if  $\text{rnd}() < e^{-\frac{H_x - H_{x_{rec}}}{T}}$  then
         $x \leftarrow x_{rec}$ 
         $H_x \leftarrow H_{x_{rec}}$ 
      end
       $T \leftarrow \alpha.T$ 
    end
  endsw
  for  $j \leftarrow 1$  to  $\text{nb}$  do
    // Diversification
     $\text{realisable} \leftarrow \text{false}$ 
    repeat
      choisir aléatoirement et uniformément  $y \in P_2(x)$ 
       $H(y) \leftarrow \text{simu}(y)$ 
      if  $H(y) < \infty$  then
         $\text{realisable} \leftarrow \text{true}$ 
      end
    until  $\text{realisable} = \text{true}$ 
     $x \leftarrow y$ 
  end
end

```

évaluons la solution avec le modèle de simulation à chaque itération. Les valeurs de *nbIter* et *palier* ont été déterminées dans les mêmes conditions que pour le premier couplage.

IV Mise en œuvre et résultats

Suite aux expérimentations sur différentes instances, le premier couplage a donné des résultats moins intéressants, par conséquent nous avons décidé de ne présenter dans ce mémoire que les résultats relatifs au second couplage. Dans un premier temps les méthodes ont été testées sur des instances de la littérature réalisées pour un problème proche du nôtre. Cette partie se poursuit avec les adaptations faites sur ces instances afin qu'elles correspondent à notre problème. Les résultats obtenus sont présentés dans les deux cas.

1 Comparaison avec des résultats de la littérature

1.1 Présentation du problème et des instances de Bredström et Rönnqvist (2008)

$1P, Disp_P, Tr_1 | Pref_P, Prec, Sync | C_T$
 $1P, Disp_P, Tr_1 | Pref_P, Prec, Sync | Balance$
 $1P, Disp_P, Tr_1 | Pref_P, Prec, Sync | Satis$
 $1P, Disp_P, Tr_1 | Pref_P, Prec, Sync | C_T, Satis$

Bredström et Rönnqvist (2008) ont travaillé sur un problème proche de celui que nous traitons. Nous remercions les auteurs de nous avoir fourni leurs instances grâce auxquelles nous avons pu adapter nos méthodes de résolution et faire des comparaisons. Les auteurs proposent une méthode de résolution pour la construction de tournées de soins à domicile pour un type de ressource avec contraintes de synchronisation. La synchronisation d'activités est modélisée par deux activités devant être réalisées simultanément chez le même patient par deux ressources différentes. Chaque patient a une période de disponibilité pendant laquelle il doit recevoir ses soins. Enfin, la préférence du patient pour une ressource est prise en compte comme critère de performance ainsi que la durée et l'équilibrage des tournées. La préférence est exprimée par un réel compris entre -10 et 10, plus la préférence est proche de -10, plus la préférence est élevée. L'équilibrage des tournées se fait suivant la durée des tournées. Le tableau 2.2 permet de comparer les deux problèmes.

Caractéristiques	Bredström <i>et al.</i>	Notre problème
Préférence des patients	✓	✓
Disponibilité des patients	✓	✓
Niveau de dépendance des patients		✓
Activités synchronisées	✓	✓
Type de ressource		✓

Critères	Bredström <i>et al.</i>	Notre problème
Distance parcourue	✓	✓
Préférence des patients	✓	✓
Équilibrage des tournées	selon la durée	selon le niveau de dépendance

Tableau 4.2 – Comparaison entre le problème de Bredström et Rönnqvist (2008) et notre problème

Les instances construites par les auteurs sont de trois tailles :

- cinq instances de petit taille composées de 20 activités et 4 ressources ;
- trois instances de taille moyenne composées de 50 activités et 10 ressources ;
- deux instances de grande taille composées de 80 activités et 16 ressources.

Le tableau 4.3 donne pour chaque taille d'instance, le numéro pour les identifier, le nombre d'activités (n_A), le nombre de ressources (n_R) et le nombre d'activités synchronisées. Chacune des instances est

taille	numéro	n_A	n_R	Nb activités synchronisées
petite	1 à 5	20	4	2
moyenne	6 à 8	50	10	5
grande	9 et 10	80	16	8

Tableau 4.3 – Tailles des instances de Bredström et Rönnqvist (2008)

déclinée en cinq variantes, chaque variante diffère par l'amplitude des fenêtres de temps comme décrit dans le chapitre 2 :

- F (*fixed*) : la date de début de chaque activité est fixée, l'amplitude des fenêtres de temps est nulle,
- S (*small*) : l'amplitude moyenne des fenêtres de temps de début des activités varient entre 1,3 et 1,8 heures suivant les instances,
- M (*medium*) : l'amplitude moyenne des fenêtres de temps est compris entre 2,1 et 2,9 heures suivant les instances,
- L (*large*) : l'amplitude moyenne des fenêtres de temps varie entre 2,9 et 3,9 heures suivant les instances,
- A (*no restrictions*) : les dates de début des activités ne sont pas soumises à des contraintes de fenêtres de temps.

Les critères durée des tournées et équilibrage sont exprimés en heure après avoir été normalisés sur une journée de travail de neuf heures. L'horizon pour l'organisation des tournées est noté H . Les autres notations utilisées sont celles de la modélisation mathématique présentée dans le chapitre 3. Les trois critères se calculent ainsi :

1. la durée des tournées calculée par (4.8)

$$T_{Bred} = \left(\sum_{i \in A} \sum_{j \in A} \sum_{k \in R} D_{ij} \cdot x_{ijk} \right) \cdot \frac{9}{H} \quad (4.8)$$

2. la préférence des patients calculée par (4.9)

$$C_{Bred} = \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} \sum_{k \in R} C_{ik} \cdot x_{ijk} \quad (4.9)$$

3. l'équilibrage des tournées calculé suivant la durée des tournées et non le niveau de dépendance des patients. L'équation (4.10) calcule le critère d'équilibrage.

$$\delta_{Bred} = \frac{9}{H} \cdot w / \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} D_{ij} \cdot x_{ijk} - \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} D_{ij} \cdot x_{ijk'} \leq w, \forall (k, k') \in R^2, k' \neq k \quad (4.10)$$

La fonction objectif est :

$$\min \alpha_1 \cdot T_{Bred} + \alpha_2 \cdot C_{Bred} + \alpha_3 \cdot \delta_{Bred} \quad (4.11)$$

où $\alpha_i, i \in \{1, 2, 3\}$ sont des coefficients de pondération. Les valeurs des coefficients (cf. tableau 4.4) dépendent de la taille des instances que nous décrivons à présent.

Pour les instances de petite taille, chaque critère de performance est traité indépendamment des deux autres. Ensuite, sur les instances L , le critère considéré est la somme de la durée et de l'équilibrage. Pour les instances moyennes et grandes, le critère utilisé est la somme de la durée (4.8) et de l'équilibrage des tournées (4.10). Les coefficients correspondants se retrouvent dans le tableau 4.4.

taille	α_1	α_2	α_3
petite	1	0	0
	0	1	0
	0	0	1
	1	0	1
moyenne	1	0	1
grande	1	0	1

Tableau 4.4 – Coefficients de la fonction objectif - Instances de Bredström et Rönnqvist (2008)

1.2 Adaptation de nos méthodes pour la résolution de ces instances

Pour résoudre ces instances, nous avons adapté nos méthodes aux caractéristiques du problème traité par Bredström et Rönnqvist (2008). Ces adaptations portent sur trois points : la modélisation des activités synchronisées et de la préférence du patient, les systèmes de voisinage, la fonction objectif et la construction d'une solution initiale.

1.2.0.1 Modélisation

Dans nos travaux, la synchronisation d'activités est modélisée par une activité réalisée par deux ressources. Donc le nombre d'activités des instances a été adapté pour coller à cette modélisation. Suivant notre modélisation, les instances 1 à 5 sont donc composées de 18 activités dont 2 synchronisées, les instances 6 à 8 de 45 activités dont 5 synchronisées et les instances 9 et 10 de 72 activités dont 8 synchronisées.

Ensuite, le degré de compatibilité modélise le type de ressource requis et la préférence du patient. C'est un réel compris entre 0 et 1. Pour travailler sur les instances de Bredström et Rönnqvist (2008), nous le remplaçons par un réel compris entre -10 et 10. Le degré de compatibilité strictement positif entre une ressource et une activité n'est plus requis pour qu'une ressource réalise une activité. Ce changement a un impact sur les systèmes de voisinages utilisés.

1.2.0.2 Systèmes de voisinage

Les voisinages insertion I_2 et permutation P_2 tiennent compte des compatibilités pour modifier les tournées. Cela n'est plus nécessaire. Dans ce cas, l'algorithme du voisinage I_2 devient l'algorithme 15 et l'algorithme du voisinage P_2 devient l'algorithme 16.

Algorithme 15 : Adaption du Voisinage insertion I_2

1. choisir aléatoirement et uniformément une ressource k_1
 2. choisir aléatoirement et uniformément une activité i réalisée par la ressource k_1
 3. choisir aléatoirement et uniformément une ressource k_2
 4. choisir aléatoirement et uniformément une position b dans la liste ordonnée d'activités réalisées par la ressource k_2
 5. insérer l'activité i à la position b dans la liste ordonnée d'activités réalisées par la ressource k_2
-

Algorithme 16 : Adaptation du voisinage permutation P_2

1. choisir aléatoirement et uniformément une ressource k_1
 2. choisir aléatoirement et uniformément une activité i réalisée par la ressource k_1
 3. choisir aléatoirement et uniformément une ressource k_2
 4. choisir aléatoirement et uniformément une activité j réalisée par la ressource k_2
 5. échanger les activités i et j
-

1.2.0.3 Fonction objectif

L'évaluation des critères de performance est faite à partir des formules (4.8), (4.9) et (4.10). À cela, nous ajoutons les pénalités liées au non-respect des dates de début au plus tard qui sont calculées selon la formule (4.3). La fonction objectif est de la forme suivante :

$$\min \alpha_1.T_{Bred} + \alpha_2.C_{Bred} + \alpha_3.\delta_{Bred} + \alpha_4.pen \quad (4.12)$$

où $\alpha_i, i \in \{1, 2, 3, 4\}$ sont les coefficients de pondération définis dans le tableau 4.5.

instance	α_1	α_2	α_3	α_4
petite	1	0	0	100
	0	1	0	100
	0	0	1	100
	1	0	1	100
moyenne	1	0	1	1000
grande	1	0	1	1000

Tableau 4.5 – Adaption des coefficients de la fonction objectif

1.2.0.4 Construction d'une solution initiale

La construction d'une solution initiale de notre problème tient compte du type des ressources. Nous n'avons plus cette contrainte, par conséquent chaque activité peut être affectée à n'importe quelle ressource.

1.3 Résultats

Les résultats détaillés pour toutes les répliques sur les instances de Bredström et Rönnqvist (2008) se trouvent dans l'annexe 1. Dans le cœur du document, seuls les tableaux de synthèse sont présents. Cependant le tableau 4.6 permet au lecteur de se repérer dans l'annexe 1 pour retrouver le détail des résultats suivant les méthodes et les instances. Dans ces tableaux, la colonne *BK* donne la meilleure solution obtenue avec une résolution à l'aide du solveur OPT en limitant le temps de calcul à une heure, la colonne *Bred* la solution obtenue avec l'heuristique proposée par Bredström et Rönnqvist (2008) en limitant le temps de résolution à deux minutes et les autres colonnes les résultats que nous avons obtenus. Une case en gras indique que la solution est optimalement prouvée. Une case grisée montre que nous avons égalé la meilleure solution et une case grisée en gras montre que nous améliorons la meilleure solution connue.

Instance	Critère	Recuit simulé	Recherche locale itérée		
			<i>RW</i>	<i>BW</i>	<i>MW</i>
Petite	durée des tournées	tab. 6.2	tab. 6.5	tab. 6.6	tab. 6.7
	préférence patients	tab. 6.3	tab. 6.8	tab. 6.9	tab. 6.10
	équilibre des tournées	tab. 6.4	tab. 6.11	tab. 6.12	tab. 6.13
	durée et équilibre	-	-	tab. 6.14	
Moyenne	durée et équilibre	-	-	tab. 6.15	tab. 6.16
Grande	durée et équilibre	-	-		

Tableau 4.6 – Tableau de lecture des résultats en annexe - instances de Bredström et Rönnqvist (2008)

1.3.1 Instances de petite taille

1.3.1.1 Recuit simulé

La température initiale est déterminée en utilisant l'algorithme 5 présenté dans la section 1 de ce chapitre. Elle est de $1,25 \cdot 10^6$. Cinq réplifications de cinq millions d'itérations sont effectuées pour chacun des critères. Compte tenu des résultats obtenus, la température initiale a été diminuée car en acceptant toutes les transitions au début, la diversification est très importante mais il est difficile de faire baisser les pénalités à zéro et ainsi obtenir une solution réalisable. Ensuite, une fois qu'une solution réalisable est trouvée, la valeur de la fonction objectif baisse et plus aucune solution voisine non réalisable ne sera acceptée. Par conséquent, la solution reste bloquée dans un minimum local. Nous avons donc divisé la température initiale par 100 et baissé la valeur de α_4 à 5 (initialement elle était à 100). Les pénalités moins fortes engendrent un plus faible écart dans la fonction objectif entre une solution non réalisable et une solution réalisable et la baisse de la température initiale permet d'accepter moins de solutions non améliorantes pour atteindre plus rapidement une solution admissible. Malgré la modification des paramètres, l'espace de recherche chaotique rend le recuit simulé peu efficace.

Pour illustrer cela, le tableau 4.7 synthétise les résultats obtenus sur l'instance 1 pour chaque réplification, la meilleure solution, la moins bonne solution, la moyenne des solutions ainsi que l'écart-type. La colonne *BK* est la meilleure solution connue et la colonne Bredstrom est la solution trouvée avec l'heuristique des auteurs. Malgré la modification de T_0 et α_4 , les résultats sont encore éloignés des bornes supérieures données par Bredström et Rönnqvist (2008) voire aucune solution réalisable n'est trouvée lorsque le problème tient compte des fenêtres de temps. En s'intéressant à la dernière ligne (instance 1A), nous constatons que la meilleure réplification permet d'améliorer la borne supérieure de la littérature. Cependant les instances *A* n'ont pas de fenêtres de temps et ne correspondent donc pas complètement au problème présenté dans ce mémoire. À la suite de ce constat, le recuit simulé, avec les paramètres utilisés, ne paraît pas indiqué pour notre problème.

Les résultats des autres instances de petite taille avec le recuit simulé pour chacun des critères se trouvent dans l'annexe 1.

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1F	5.13	5.13	5.96	-	-	-	-	5.96	5.96	5.96	0.0
1S	3.55	3.55	5.68	5.0	5.41	-	5.45	5.0	5.38	5.68	0.245
1M	3.55	3.55	4.67	4.81	5.06	4.48	5.06	4.48	4.81	5.06	0.225
1L	3.39	3.39	5.09	3.42	4.55	4.49	4.62	3.42	4.43	5.09	0.549
1A	3.16	3.16	3.2	3.14	3.5	3.22	3.19	3.14	3.25	3.5	0.128

Tableau 4.7 – Instance 1 de Bredström et Rönnqvist (2008) - Durée des tournées - recuit simulé

1.3.1.2 Comparaison des critères d'acceptation de la recherche locale itérée

La phase *AcceptanceCriterion*, qui ne tient pas compte de la valeur de la fonction objectif, permet de couvrir une plus grande partie de l'espace de recherche que le recuit simulé, ainsi les variations importantes de la fonction objectif entre une solution réalisable et une solution non réalisable n'enferme pas la méthode dans un minimum local. Cinq réplifications ont été réalisées, le nombre d'itérations, la valeur du palier (nombre d'itérations sans amélioration) suivant la taille des instances ainsi que les temps de calcul sont indiqués dans le tableau 4.8.

Les tableaux 4.9 (fenêtre de temps) et 4.10 (critère de performance) donnent, pour chaque méthode, le pourcentage d'instances pour lequel chaque critère d'acceptation donne la meilleure solution. Les cellules grisées font ressortir la méthode qui apporte une meilleure solution sur le plus grand nombre d'instances. Nous présentons les résultats pour la meilleure réplification et les résultats moyens. Il ressort

$ A $	Nb d'itérations			Palier	Temps de calcul
	Durée	Équilibrage	Préférence		
18	10^6	$2, 5 \cdot 10^6$	10^6	750	10 à 29 s.
45	$3 \cdot 10^6$		-	1500	45 s.
72	$5 \cdot 10^6$		-	5000	88 s.

Tableau 4.8 – Paramètres de la Recherche Locale Itérée

que selon l'amplitude des fenêtres de temps, *RW* apporte peu de meilleures solutions, tant en valeur minimale qu'en moyenne. Au mieux, la meilleure solution est trouvée pour 60% des instances *L* alors que *BW* et *MW* la trouve pour 73% des instances. En considérant les valeurs minimales, *MW* se détache pour toutes les amplitudes de fenêtre de temps même si *BW* a des performances identiques sur les instances *S* et *L*. En valeur moyenne, *MW* est plus efficace que *BW* pour les instances *F*, *S*, *M* et *A* alors que *BW* est meilleur sur les instances *L*.

Instance	meilleure solution			solution moyenne		
	<i>RW</i>	<i>BW</i>	<i>MW</i>	<i>RW</i>	<i>BW</i>	<i>MW</i>
<i>F</i>	27%	60%	80%	7%	27%	73%
<i>S</i>	27%	73%	73%	0%	40%	73%
<i>M</i>	40%	60%	100%	13%	53%	73%
<i>L</i>	60%	73%	73%	20%	87%	53%
<i>A</i>	47%	60%	100%	27%	40%	87%

Tableau 4.9 – Comparaison entre critères d'acceptation suivant l'amplitude des fenêtres de temps - petites instances

Concernant les critères de performance, comme précédemment *RW* n'apporte pas la majorité des meilleures solutions quel que soit le critère de performance considéré. Pour la durée des tournées, *BW* est un peu meilleur que *MW* (pour la solution minimale et la solution moyenne). En revanche, *MW* est nettement devant pour les deux autres critères.

Critère	meilleure solution			solution moyenne		
	<i>RW</i>	<i>BW</i>	<i>MW</i>	<i>RW</i>	<i>BW</i>	<i>MW</i>
Durée	80%	92%	88%	40%	76%	72%
Préférence	20%	52%	84%	0%	36%	72%
Équilibrage	20%	52%	84%	0%	36%	72%

Tableau 4.10 – Comparaison entre critères d'acceptation suivant les critères de performance - petites instances

1.3.1.3 Comparaison avec les résultats obtenus par l'heuristique de Bredström et Rönnqvist (2008)

Les résultats de l'heuristique de Bredström et Rönnqvist (2008) sont obtenus avec un temps de calcul de deux minutes. L'analyse est faite selon les critères de performance et l'amplitude des fenêtres de temps. Nous nous sommes placés dans le même cadre que les auteurs, nous présentons donc la meilleure solution trouvée. Cependant, les valeurs moyennes, maximales ainsi que l'écart-type sont

présents en annexe. Pour les instances F , les résultats obtenus avec l’heuristique sont meilleurs, elle obtient une meilleure solution pour 93% des instances. L’heuristique de Bredström et Rönnqvist (2008) est basée sur la résolution successive de programmes linéaires en nombres entiers relaxés. Les fenêtres de temps d’amplitude nulle contraignent plus le problème et donc favorise la résolution des programmes linéaires. En revanche, dès que les fenêtres de temps ont des amplitudes strictement positives (S , M et L), nos méthodes trouvent une solution au moins aussi bonne que l’heuristique, aussi bien avec le critère d’acceptation BW que MW . RW est plus efficace que l’heuristique pour les instances M , L et A mais ne rivalise pas avec BW et MW . Pour les instances sans fenêtre de temps (A), la recherche locale itérée MW obtient les meilleurs résultats pour toutes les instances.

Instances	Bredstrom	RW	BW	MW
F	93%	13%	40%	53%
S	67%	47%	73%	67%
M	47%	67%	73%	93%
L	40%	53%	87%	87%
A	13%	80%	87%	100%

Tableau 4.11 – Comparaison entre méthodes suivant l’amplitude des fenêtres de temps - petites instances

Pour les critères de performance, nous constatons que la recherche locale itérée avec le critère d’acceptation BW ou MW apporte une solution au moins aussi bonne que l’heuristique de Bredström et Rönnqvist (2008) dans la majorité des cas. RW arrive au même pourcentage que l’heuristique pour l’équilibrage des tournées, un pourcentage meilleur pour la durée des tournées mais plus faible pour la préférence des patients.

Instances	Bredstrom	RW	BW	MW
Durée	68%	80%	96%	88%
Préférence	75%	48%	76%	76%
Équilibrage	32%	32%	44%	76%

Tableau 4.12 – Comparaison entre méthodes suivant le critère - petites instances

Bredström et Rönnqvist (2008) travaillent également sur une résolution suivant deux critères en considérant la somme de la durée et de l’équilibrage. Nous nous plaçons dans le même cadre en réalisant vingt répliquions sur les instances $1L$, $2L$, $3L$, $4L$ et $5L$. Le tableau 4.13 donne les valeurs minimales, maximales et moyennes des vingt répliquions. Le détail des résultats des vingt répliquions est dans l’annexe 1. Sur les cinq instances, la valeur minimale est améliorée pour deux instances ($1L$, et $4L$). La

instance	Bredstrom			BW			MW		
	min	$moy.$	max	min	$moy.$	max	min	$moy.$	max
$1L$	4.01	4.29	4.88	3.91	4.10	4.26	3.91	4.12	4.33
$2L$	3.96	4.09	4.39	3.96	4.09	4.25	3.98	4.10	4.29
$3L$	3.63	3.94	4.38	3.63	4.04	4.29	3.67	4.17	4.36
$4L$	5.88	6.41	7.77	5.69	5.98	6.25	5.87	6.08	6.37
$5L$	3.70	3.83	4.33	3.8	3.98	4.22	3.98	4.14	4.31

Tableau 4.13 – Comparaison - instance L - critère durée + équilibrage

valeur moyenne est améliorée pour deux instances ($1L$ et $4L$) avec le critère d'acceptation BW . Enfin, la valeur maximale est améliorée pour les cinq instances.

Les résultats obtenus montrent que notre approche est valable pour aborder notre problème et qu'elle permet même d'améliorer certains résultats de la littérature. Cependant les trois critères d'acceptation ne donnent pas de résultats identiques, RW pouvant être écarté. Dans la suite de ce mémoire, nous utiliserons donc les critères d'acceptation BW et MW .

1.3.1.4 Comparaison avec les résultats obtenus par Afifi et al. (2013)

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre 2, Afifi et al. (2013) a proposé un algorithme de résolution pour les problèmes de tournées de véhicules avec contraintes de synchronisation. Les tests sont réalisés sur les instances S , M et L , le critère considéré est la durée des tournées pour toutes les instances alors que Bredström et Rönnqvist (2008) considère la durée pour les instances de petite taille et la somme pondérée de la durée et de l'équilibrage pour les instances de taille supérieure.

Sur les instances 1 à 5, la méthode proposée par Afifi et al. (2013) améliore les résultats obtenus avec l'heuristique de Bredström et Rönnqvist (2008) pour les instances $1L$, $2L$, $3M$, $4M$ et $4L$ avec des temps de calcul plus faible. Les résultats pour ces instances sont résumés dans le tableau 4.14. Nous constatons que la méthode des auteurs donnent des résultats plus rapidement pour ces instances que MW et que pour l'instance $4M$ la valeur de la fonction objectif est 1.3% meilleure.

Instances	Afifi et al. (2013)		MW	
	Durée	Tps(s)	Durée	GAP
$1L$	3.39	0.29	3.39	0%
$2L$	3.42	0.64	3.42	0%
$3M$	3.33	0.92	3.33	0%
$4M$	5.67	0.72	5.75	1.3%
$4L$	5.13	4.66	5.13	0%

Tableau 4.14 – Comparaison avec la méthode proposée par Afifi et al. (2013)

1.3.1.5 Nouvelles bornes supérieures sur les instances de petite taille

La recherche locale itérée (BW et MW principalement) permet d'améliorer la borne supérieure de certaines instances de petite taille (instances 1 à 5). Dans le tableaux 4.15 à 4.18, nous renseignons pour chacun des critères, l'ancienne et la nouvelle borne supérieure ainsi que le gain. Ce dernier est calculé de manière suivante : $gain = \frac{Ancienne_BS - Nouvelle_BS}{Nouvelle_BS}$.

- **Critère durée des tournées.** Sur les vingt-cinq instances (5 instances \times 5 amplitudes de fenêtres de temps), nous retrouvons la meilleure solution connue pour 17 instances (dont 7 optimales prouvées) avec BW . Avec MW , nous retrouvons la meilleure solution connue pour 15 instances dont 10 optimale. Enfin, nous trouvons une nouvelle borne supérieure pour 5 instances donnée dans le tableau 4.15.
- **Critère préférence du patient.** Sur les 25 instances, nous retrouvons avec BW la meilleure solution pour 14 instances dont 11 optimales. Avec MW , nous retrouvons la meilleure solution pour 14 instances dont 12 optimales. Nous améliorons 6 bornes supérieures données dans le tableau 4.16.
- **Équilibrage des tournées** Sur les 25 instances, avec BW , nous retrouvons la meilleure solution pour 9 instances dont 1 optimale et avec MW pour 9 instances dont 2 optimales. Nous trouvons

Instance	Ancienne Borne sup.	Nouvelle borne sup.	Gain
1A	3.16	3.12	1.28%
2A	3.34	2.97	12.46%
3A	3.1	2.85	8.77%
4A	4.91	4.29	14.45%
5A	3.26	2.92	11.64%

Tableau 4.15 – Nouvelles bornes supérieures - durée des tournées - instances de petite taille

Instance	Ancienne Borne sup.	Nouvelle borne sup.	Gain
2L	-106.06	-107.64	1.47%
3A	-111.29	-112.5	1.08%
4M	-105.42	-106.72	1.22%
4L	-105.42	-109.29	3.54%
4A	-105.42	-111.74	5.66%
5A	-84.21	-84.66	0.53%

Tableau 4.16 – Nouvelles bornes supérieures - préférence des patients - instances de petite taille

une nouvelle borne supérieure pour 11 instances dont 1 optimale reportées dans le tableau 4.17. Pour l'instance 1L, le calcul du gain n'a pas de sens (division par 0), nous avons donc renseigné optimal car la solution est forcément optimale. Il faut noter que les pourcentages de gain sont très élevés cependant un critère égal à 0.012 correspond pour ce problème à un écart de 1 minute entre la tournée la plus longue et la plus courte. Par conséquent, gagner une minute sur la meilleure solution connue entraîne un pourcentage de gain très important.

Instance	Ancienne Borne sup.	Nouvelle borne sup.	Gain
1L	0.026	0	optimal
2M	0.025	0.012	100%
3S	0.064	0.013	400%
3M	0.038	0.013	200%
3A	0.026	0.013	100%
4S	0.13	0.065	100%
4L	0.032	0.016	100%
4A	0.032	0.016	100%
5M	0.038	0.025	50%
5L	0.025	0.013	100%
5A	0.025	0.013	100%

Tableau 4.17 – Nouvelles bornes supérieures - équilibrage des tournées - instances de petite taille

- **Critère durée + équilibrage des tournées.** Pour les instances 1L, 2L, 3L, 4L, et 5L, nous retrouvons la meilleure solution pour 2 instances et nous améliorons la borne supérieure pour 2 instances comme nous le constatons dans le tableau 4.18.

Instance	Ancienne Borne sup.	Nouvelle borne sup.	Gain
1L	4.01	3.91	2.56%
4L	5.88	5.69	3.34%

Tableau 4.18 – Nouvelles bornes supérieures - durée + équilibrage des tournées - instances de petite taille

1.3.2 Instances de taille moyenne et grande

1.3.2.1 Comparaison avec les résultats obtenus par l’heuristique de Bredström et Rönnqvist (2008)

Pour ces instances, cinq réplifications ont été réalisées. Le critère est la somme de la durée et de l’équilibrage des tournées. Bredström et Rönnqvist (2008) ont choisi d’abandonner les instances F , les tests sont réalisés sur les instances S , M , L et A . Le tableau 4.19 permet de comparer les résultats obtenus avec l’heuristique des auteurs et ceux trouvés avec la résolution que nous proposons (recherche locale itérée BW et MW). Toutes les réplifications, aussi bien avec BW que MW , améliorent les résultats obtenus avec l’heuristique de Bredström et Rönnqvist (2008) aussi bien la valeur minimale que la valeur moyenne. Le critère d’acceptation BW devient beaucoup plus performant que MW lorsque les instances augmentent de taille. Seule une solution minimale des instances $1L$, $2S$ et $2L$ est meilleure avec MW .

1.3.2.2 Nouvelles bornes supérieures sur les instances de taille moyenne et grande

La recherche locale itérée (BW et MW principalement) permet d’améliorer la borne supérieure pour toutes les instances de taille moyenne et grande (instances 6 à 10) pour le critère durée et équilibrage des tournées avec des gains supérieurs à 20% (cf. tableau 4.20). Il faut noter que nous avons trouvé des solutions pour les instances $8S$, $8M$, $9S$ et $9M$ qui n’étaient pas résolues par l’heuristique de Bredström et Rönnqvist (2008).

L’espace de recherche chaotique, à cause des pénalités de dépassement des fenêtres de temps, ne permet pas au recuit simulé de fonctionner efficacement. La diversification importante apportée par le critère d’acceptation RW ne permet pas de converger vers une solution de bonne qualité. Enfin, pour les instances de grande taille, le critère BW qui favorise l’intensification semble plus efficace. Les méthodes ont d’avantage besoin d’être guidées sur ces instances. En revanche, sur les instances plus petites, il semble plus efficace d’introduire une dose de diversification dans la recherche. En conséquence, nous choisissons de travailler sur les instances de notre problème avec notre couplage basée sur la recherche locale itérée BW et MW . De plus, ces deux critères ont montré une certaine efficacité compte-tenu des nouvelles bornes supérieures trouvées pour certaines instances non optimalement résolues.

2 Résultats obtenus pour notre problème

2.1 Adaptation des instances pour la résolution de notre problème

Nous avons adapté les instances précédentes pour qu’elles soient en adéquation avec notre problème. Les fenêtres de temps, les durées d’activités et les temps de transport ont été conservés. En revanche la préférence de patient $C_{Bredstrom} \in [-10; 10]$ a été modifiée pour obtenir le degré de compatibilité $C_{ik} \in [0; 1]$ avec trois décimales comme l’indique la formule suivante :

$$C = \frac{\lfloor \frac{C_{Bredstrom} + 10}{20} \cdot 1000 \rfloor}{1000}$$

Un niveau de dépendance compris entre 1 et 4 a été affecté à chaque activité. Les proportions sont choisies suivant les travaux de Chevreul et al. (2009) abordés dans le chapitre I :

		<i>BW</i>				<i>MW</i>			
	<i>Bred</i>	<i>min</i>	<i>moy.</i>	<i>max</i>	σ	<i>min</i>	<i>moy.</i>	<i>max</i>	σ
6 <i>S</i>	13.69	11.14	11.73	12.15	0.42	11.85	12.29	12.69	0.31
6 <i>M</i>	12.8	10.38	10.62	10.94	0.18	10.82	11.21	11.53	0.23
6 <i>L</i>	11.87	9.76	10.00	10.17	0.15	9.72	10.36	10.6	0.33
6 <i>A</i>	11.88	8.33	8.65	8.97	0.21	8.88	9.29	9.51	0.21
7 <i>S</i>	15.06	11.83	11.99	12.37	0.20	11.71	12.11	12.51	0.29
7 <i>M</i>	13.45	10.15	10.50	11.09	0.38	10.2	10.74	11.26	0.40
7 <i>L</i>	11.52	9.73	9.92	10.41	0.25	9.61	10.10	10.37	0.27
7 <i>A</i>	12.41	7.97	8.48	8.83	0.31	8.63	8.95	9.24	0.24
8 <i>S</i>	-	11.46	12.11	12.57	0.39	11.84	12.38	12.92	0.36
8 <i>M</i>	-	10.24	10.68	11.28	0.36	10.4	10.84	11.32	0.38
8 <i>L</i>	15.16	9.67	9.94	10.06	0.14	10.31	10.41	10.53	0.08
8 <i>A</i>	13.01	8.41	8.70	9.00	0.21	8.70	8.94	9.08	0.14
9 <i>S</i>	-	14.85	15.33	15.80	0.30	15.18	15.79	16.38	0.40
9 <i>M</i>	-	13.69	14.00	14.34	0.28	13.83	14.34	14.62	0.27
9 <i>L</i>	20.68	13.13	13.37	13.60	0.17	13.25	13.57	13.71	0.16
9 <i>A</i>	22.89	11.16	11.46	11.67	0.17	11.53	12.07	12.38	0.30
10 <i>S</i>	16.24	12.42	13.50	13.66	0.41	12.76	13.30	13.67	0.33
10 <i>M</i>	15.33	11.61	11.89	12.22	0.23	11.63	12.12	12.68	0.34
10 <i>L</i>	17.61	11.00	11.49	11.71	0.25	11.46	11.54	11.71	0.09
10 <i>A</i>	17.59	9.81	10.14	10.41	0.21	9.84	10.33	10.72	0.28

Tableau 4.19 – Instances 6 à 10 - durée et équilibrage des tournées - recherche locale itérée *BW* et *MW*

- GIR1 : 11%
- GIR2 : 42%
- GIR3 : 24%
- GIR4 : 23%

Les instances de la littérature sont construites avec 10% d'activités synchronisées et un type de ressource. À partir d'une instance, nous en construisons quatre. La première est conservée telle quelle. Pour la seconde, la part d'activités synchronisées passe de 10% à 20%. La troisième instance est construite à partir de la première en considérant deux types de ressources. Enfin, la quatrième est construite à partir de la deuxième et la troisième pour obtenir 20% d'activités synchronisées et deux types de ressources. Pour augmenter le nombre de types de ressource, nous avons suivi les proportions d'activités réalisées par les infirmiers et les aides-soignants données dans le chapitre 1 section I, 1.3.2. Ainsi pour les problèmes qui considèrent deux types de ressources :

- instances de petite taille (4 ressources), 1 ressource est de type 1 et 3 de types 2 ;
- instances de taille moyenne (10 ressources), 3 ressources sont de type 1 et 7 de type 2 ;
- instances de grande taille (16 ressources), 5 ressources sont de type 1 et 11 de type 2.

Pour chaque taille d'instances, 20% des activités sont réalisées par une ressource de type 1, 50 % par une ressource de type 2 et 30% par une ressource de type 1 ou 2. Concernant les petites instances, il faut veiller à ce que les activités synchronisées puissent être réalisées par au moins deux ressources c'est-à-

Instance	Ancienne Borne sup.	Nouvelle borne sup.	Gain
6 <i>S</i>	13.69	11.14	22.89%
6 <i>M</i>	12.80	10.38	23.31%
6 <i>L</i>	11.87	9.72	22.12%
6 <i>A</i>	11.88	8.33	42.62%
7 <i>S</i>	15.06	11.71	28.61%
7 <i>M</i>	13.45	10.15	33.17%
7 <i>L</i>	11.52	9.61	19.88%
7 <i>A</i>	12.41	7.97	55.71%
8 <i>S</i>	-	11.46	-
8 <i>M</i>	-	10.24	-
8 <i>L</i>	15.16	9.67	56.77%
8 <i>A</i>	13.01	8.41	54.70%
9 <i>S</i>	-	14.85	-
9 <i>M</i>	-	13.69	-
9 <i>L</i>	20.68	13.13	57.51%
9 <i>A</i>	22.89	11.16	105.11%
10 <i>S</i>	16.24	12.42	30.76%
10 <i>M</i>	15.33	11.61	32.04%
10 <i>L</i>	17.61	11.00	60.09%
10 <i>A</i>	17.59	9.81	79.31%

Tableau 4.20 – Nouvelles bornes supérieures - durée + équilibrage des tournées - petites, moyennes et grandes instances

dire que le degré de compatibilité entre cette activité et au moins deux ressources soient strictement positifs. Seules les instances *S*, *M* et *L* ont été conservées car les instances *F* (fenêtres de temps d'amplitude nulle) et *A* (absence de fenêtres de temps) ne correspondent pas au problème traité. Enfin, les instances 4*S*, 4*M* et 4*L* avec 20% d'activités synchronisées n'ont pas de solution réalisable car l'augmentation des trajets liés aux activités synchronisées entraînent le non respect des fenêtres de temps. L'instance 4*S* avec 2 types de ressources et 10% d'activités synchronisées et l'instance 2*S* avec 2 types de ressources et 20% d'activités synchronisées sont dans le même cas. Le tableau 4.21 résume le nombre d'instances.

2.2 Comparaison des deux modèles mathématiques sur nos instances de petite taille

Nous avons comparé les résultats obtenus avec les deux modèles proposés dans le chapitre 3 sur les instances de petite taille avec (1 type de ressource et 10% d'activités synchronisées) et (2 types de ressource et 20% d'activités synchronisées). Le temps de résolution avec le solveur CPLEX 12.6 est limité à une heure. Pour le premier modèle, le critère prioritaire considéré est l'équilibrage suivant les niveaux de dépendance des patients. Nous testons ensuite les deux possibilités, la distance puis la compatibilité en critère secondaire. Pour le second modèle, nous fixons tout d'abord la valeur de la tolérance ϵ à 2 puis à 1. Dans les deux cas, nous testons les deux combinaisons de critère : distance - compatibilité et compatibilité - distance.

Les tableaux de résultats 4.22 à 4.25 contiennent, pour chaque instance, les informations suivantes :

Nb de type de ressources	% d'activités synchronisées	Nombre d'instances
1	10	15
	20	12
2	10	14
	20	11

Tableau 4.21 – Nombre d'instances

- la valeur prise par chacun des critères (durée, compatibilité, dépendance minimum et maximum) ;
- pour le modèle 1, le temps de résolution à l'aide du solveur Cplex (exprimé en secondes), si la solution optimale n'est pas trouvée dans le temps imparti, nous indiquons le gap entre la meilleure borne inférieure et la solution trouvée ;
- pour le modèle 2, le temps de résolution exprimé également en secondes. L'instance 3S avec 2 types de ressource et 20% d'activités synchronisées n'a pas de solution pour $\epsilon = 1$, cela est indiqué dans les tableaux 4.24 et 4.25 par « - ». Pour toutes les autres instances, une solution optimalement prouvée est trouvée, par conséquent, nous n'indiquons pas de gap.

Tout d'abord, nous constatons que les temps de calcul sont plus faibles pour le second modèle. Lorsque $\epsilon = 2$, le modèle 2 trouve une solution optimale plus rapidement que le modèle 1 pour 47 instances (soit 92%). Pour $\epsilon = 1$, le modèle 2 reste plus rapide pour 43 instances (soit 86%) que le modèle 1. Concernant le second modèle, les temps de calcul sont plus importants pour $\epsilon = 1$ sur 34 instances (soit 68%) que pour $\epsilon = 2$. Plus généralement, le temps moyen de résolution est de 40 secondes pour $\epsilon = 2$ contre 60 secondes pour $\epsilon = 1$ et pour le premier modèle de 1568 secondes sachant qu'une solution optimale n'est pas systématiquement trouvée.

Concernant l'équilibrage des tournées avec le premier modèle, nous remarquons que l'écart entre le niveau de dépendance maximum et minimum est au plus de trois. 11% des instances sont résolues avec un écart de 0, 58% avec un écart de 1, 23% avec un écart de 2 et enfin 8% avec un écart de 3. Le second modèle permet de retrouver les résultats du premier modèle dans le cas où l'écart est de 1 ou 2 voire d'améliorer les critères de distance et de compatibilité lorsque la solution du premier modèle n'est pas optimale.

Enfin, lorsque l'écart est de 3 pour le premier modèle, le second modèle permet de trouver des solutions plus équilibrées. En contrepartie, nous constatons une dégradation du critère principal. Par exemple, dans le tableau 4.22, pour l'instance 4S, le second modèle permet d'obtenir un équilibre de meilleure qualité, mais la distance passe de 389 à 391 pour $\epsilon = 2$ et 395 pour $\epsilon = 1$. Le même phénomène se produit lorsque la compatibilité est le critère principal comme par exemple l'instance 4S dans le tableau 4.23. La compatibilité, égale à 5.973 avec le modèle 1, passe à 6.323 (resp. 6.549) pour le modèle 2 avec $\epsilon = 2$ (resp. $\epsilon = 1$). Le même constat est fait sur le second modèle lorsque ϵ diminue, cela entraîne systématiquement une dégradation de la valeur prise par le critère principal.

2.3 Comparaison entre la PLNE et notre approche sur les instances de petite taille

Le premier modèle mathématique nous a permis de déterminer une valeur de référence pour les différentes instances de petite taille. Il est à noter qu'aucun paramétrage spécifique de Cplex n'a été effectué.

La PLNE permet d'obtenir une solution en moins d'une heure pour toutes les instances de petite taille. Dans la majorité des cas la solution optimale est trouvée. Nous indiquons dans les tableaux détaillés de résultats (annexe 2) le gap entre la meilleure borne inférieure et la borne supérieure, lorsque le gap vaut 0, la solution est optimale. Les renseignements donnés dans les tableaux sont : la valeur de

	Modèle 1						Modèle 2									
							$\epsilon = 2$					$\epsilon = 1$				
	Dep.		Dist.	Comp.	GAP	Tps	Dist.	Comp.	Dep.		Tps	Dist.	Comp.	Dep.		Tps
min.	max.	min.							max.	min.				max.		
1S	12	13	282	9.482	4.97%	3600	282	8.548	12	13	3.28	282	8.548	12	13	3.05
1M	12	13	282	8.548	5.5%	3600	282	8.548	12	13	9.03	282	8.548	12	13	8.71
1L	11	13	265	7.78	5.53%	3600	265	7.78	11	13	4.68	276	8.396	12	13	28.8
2S	13	13	374	7.741	-	0.73	359	8.22	12	14	0.59	374	7.741	13	13	1.56
2M	13	13	320	7.575	-	70.6	290	8.301	12	14	3.78	320	7.575	13	13	57.7
2L	13	13	293	8.397	-	106	277	8.301	12	14	5.89	293	8.397	13	13	84.9
3S	13	14	278	8.203	2.3%	3600	278	8.203	13	14	0.87	278	8.203	13	14	0.99
3M	13	14	256	9.326	3.36%	3600	256	9.326	13	14	2.39	256	9.326	13	14	4.08
3L	13	14	253	9.326	3.42%	3600	253	9.326	13	14	8.93	253	9.326	13	14	6.46
4S	11	14	389	8.83	3.9%	3600	391	8.123	12	14	52.4	395	7.994	13	14	44.5
4M	11	14	346	8.848	5.15%	3600	350	7.75	13	14	60.2	350	7.75	13	14	83.4
4L	12	14	315	9.344	5.43%	3600	315	8.833	12	14	1860	317	8.882	13	14	2555
5S	12	13	314	6.78	-	415	313	7.43	12	14	1.51	314	6.78	12	13	1.25
5M	12	13	281	6.809	-	1515	281	6.809	12	13	1.34	281	6.809	12	13	1.26
5L	12	13	268	6.741	1.61%	3600	266	6.633	12	14	3.74	268	6.741	12	13	4.72

Tableau 4.22 – Comparaison des modèles mathématiques - 1 type de ressource 10% d'activités synchronisées - Critère Distance / Compatibilité

chaque critère, le gap, le temps de résolution pour la PLNE. Pour notre méthode de résolution, nous donnons la valeur de chaque critère de la meilleure solution trouvée parmi cinq répliques. Enfin, nous calculons le gap entre la solution trouvée avec le solveur et la meilleure solution avec notre approche. Les cases du tableau colorées en gris correspondent aux solutions qui égalent une solution optimale. L'ordre des critères dans les tableaux indique l'ordre de priorité de chaque critère.

La PLNE n'a pas permis de déterminer des bornes supérieures en une heure de résolution pour les instances de taille moyenne et grande. Par conséquent, sur les instances de petite taille, nous présenterons les résultats que nous obtenons dans le tableau 4.27 et les comparons aux résultats obtenus avec le solveur. Le GAP est calculé entre les solutions pour chaque critère indépendamment les uns des autres. Il n'a de sens que si le ou les critères prioritaires ont un gap égal à zéro. Toutes les combinaisons de priorité de critères ont été testées pour toutes les instances. Ensuite, nous présentons une comparaison entre les résultats obtenus avec *BW* et *MW* pour les instances de taille moyenne et grande.

Dans l'annexe 2 figure le détail des résultats pour toutes les instances que nous trouvons avec *BW* et *MW*. Comme dans l'annexe 1, le tableau 4.26 permet de retrouver les résultats pour chaque instance, chaque combinaison de critères et chaque méthode. Concernant les résultats obtenus avec le solveur (cf. annexe 2), une solution optimale est trouvée en moins d'une heure lorsque le critère principal est la distance ou la compatibilité. En revanche, ce n'est pas le cas lorsque le critère principal est l'équilibrage du niveau de dépendance. L'écart entre la borne supérieure et inférieure est alors inférieur à 6%. Notre méthode permet d'obtenir une meilleure solution pour une instance (1S avec un type de ressource et 10% d'activités synchronisées) avec un gain de 4.95%.

Le tableau 4.27 est une synthèse des résultats obtenus. Chaque ligne du tableau regroupe les résultats obtenus pour l'ensemble des instances correspondant à un nombre de types de ressource (« Nb de type de ress. »), un pourcentage d'activités synchronisées (« % act. sync. ») et une combinaison de critères (« Priorité »). Une ligne est identifiée par un numéro (« Id ») afin de faciliter la lecture. Dans

	Modèle 1						Modèle 2									
							$\epsilon = 2$					$\epsilon = 1$				
	Dep.		Comp.	Dist.	GAP	Tps	Comp.	Dist.	Dep.		Tps	Comp.	Dist.	Dep.		Tps
min.	max.	min.							max.	min.				max.		
1S	11	13	5.547	474	3.83%	3600	5.547	474	11	13	0.45	5.639	463	12	13	0.52
1M	11	13	5.142	450	3.61%	3600	5.142	450	11	13	0.46	5.275	429	12	13	0.63
1L	11	13	5.142	449	4.19%	3600	5.142	449	11	13	0.81	5.275	416	12	13	1.11
2S	13	13	4.399	538	-	0.09	4.399	538	13	13	0.34	4.399	538	13	13	0.23
2M	13	13	4.399	444	-	0.25	4.195	440	12	14	0.46	4.399	516	13	13	0.73
2L	13	13	4.399	444	-	0.8	4.195	424	12	14	1.23	4.399	441	13	13	5.32
3S	13	14	5.171	451	-	1329	5.159	475	13	15	0.21	5.171	451	14	15	0.36
3M	13	14	5.115	428	1.39%	3600	5.036	418	13	15	0.37	5.115	428	13	14	0.63
3L	13	14	5.115	411	2.25%	3600	5.036	417	13	15	0.98	5.115	411	13	14	1.10
4S	11	14	5.973	502	-	2525	6.323	487	12	14	0.64	6.549	448	13	14	0.97
4M	12	14	5.893	552	4.13%	3600	5.893	552	12	14	1.43	6.155	503	13	14	7.82
4L	11	14	5.69	519	4.92%	3600	5.755	521	12	14	16.3	5.796	511	13	14	10.4
5S	12	13	4.603	484	-	647	4.531	460	12	14	0.26	4.603	484	12	13	0.63
5M	12	13	4.367	429	0.56%	3600	4.258	430	12	14	0.84	4.367	429	12	13	0.63
5L	12	13	4.285	409	0.75%	3600	4.258	430	12	14	5.94	4.285	409	12	13	6.71

Tableau 4.23 – Comparaison des modèles mathématiques - 1 type de ressource 10% d'activités synchronisées - Critère Compatibilité / Distance

la colonne « Objectif », la colonne « crit. 1 » indique le pourcentage d'instances pour lequel la valeur du critère obtenue par notre méthode est identique à celle du solveur. Pour ces instances, « crit. 2 » indique le pourcentage d'instances pour lequel le second critère est également identique à celui du solveur. Les colonnes « GAP moyen » sont calculées selon le même principe. Elles donnent l'écart relatif moyen entre les critères du solveur et de notre méthode pour toutes les instances pour lesquelles l'écart est non nul. Le gap n'a pas de sens si toutes les instances sont résolues avec une solution de même coût par le solveur et notre méthode, dans ce cas, nous le notons « - ».

Par exemple, la ligne 5 concerne les résultats pour les instances avec 1 type de ressource et 10% d'activités synchronisées, le critère prioritaire est la compatibilité, puis l'équilibrage et enfin la distance. Pour *BW*, le critère de performance prioritaire (la compatibilité) est identique entre le solveur et notre approche pour 73,33% des instances (soit 11 instances sur 15). Pour les 4 autres instances, le gap moyen pour le premier critère entre la solution du solveur et de notre approche est de 2.06%. Parmi les 73.33% d'instances, 72.73% des instances (soit 8 instances sur 11) ont le critère secondaire (équilibrage) identique entre le solveur et notre approche. Pour les 3 autres instances, le gap moyen est de 0.87%. Enfin sur les 8 instances pour lesquelles le critère 1 et 2 sont identiques, 100% des instances ont le troisième critère identique. Au total, une solution optimale est obtenue pour 8 instances. Les cases grisées permettent la comparaison de *BW* et *MW*. En gris foncé, nous faisons ressortir les combinaisons de nombre de type de ressource, de pourcentage d'activités synchronisées et de critère pour lesquelles *BW* ou *MW* apportent de meilleurs résultats suivant le pourcentage d'instances résolues. Lorsque les pourcentages sont égaux, nous mettons en gris clair, les résultats où les gap sont les plus faibles.

Nous constatons que :

- pour tous les types de ressource, tous les pourcentages d'activités synchronisées et sur toutes les instances, lorsque le critère dépendance est prioritaire (lignes 17 à 24), il prend la même valeur aussi bien avec notre méthode que pour le solveur ;
- que ce soit le critère distance ou compatibilité qui soit prioritaire, l'augmentation du nombre

	Modèle 1						Modèle 2									
							$\epsilon = 2$					$\epsilon = 1$				
	Dep.		Dist.	Comp.	GAP	Tps	Dist.	Comp.	Dep.		Tps	Dist.	Comp.	Dep.		Tps
min.	max.	min.							max.	min.				max.		
1S	12	13	388	10.154	-	3.43	388	10.154	12	13	0.51	388	10.154	12	13	0.64
1M	12	13	371	10.203	-	4.81	367	11.040	12	14	1.12	371	10.203	12	13	1.74
1L	12	13	359	10.255	-	20.8	357	10.577	12	14	9.02	359	10.255	12	13	14.6
2M	13	14	443	10.062	-	9.53	435	10.413	13	15	6.28	443	10.062	13	14	9.52
2L	13	14	412	9.105	-	30.1	406	9.430	13	15	18.5	412	9.105	13	14	47.1
3S	13	15	474	10.618	-	2.86	474	10.618	13	15	0.57	-	-	-	-	-
3M	13	15	399	9.929	-	55.8	397	9.813	14	16	20.8	405	9.287	14	15	15.9
3L	13	15	362	9.659	1.54%	3600	362	9.659	13	15	11.83	370	10.653	14	15	14.1
5S	14	15	425	7.753	-	3.03	425	7.753	14	15	0.43	425	7.753	14	15	0.25
5M	14	15	416	7.036	-	25.3	416	7.036	14	15	0.95	416	7.893	14	15	0.42
5L	14	15	380	7.182	-	1665	380	7.182	13	15	4.71	398	6.634	14	15	13.8

Tableau 4.24 – Comparaison des modèles mathématiques - 2 type de ressource 20% d'activités synchronisées - Critère Distance / Compatibilité

de type de ressource impacte la part d'instances ayant une solution identique au solveur, par exemple, on passe de 73% pour un type de ressource à 27% pour deux types de ressource (lignes 1 et 3) lorsque la compatibilité est prioritaire ;

- la tendance est similaire lorsque la part d'activités synchronisées augmente, par exemple, on passe de 50% à 9% (lignes 11 et 12 ou lignes 15 et 16) à l'exception des lignes 3 et 4 pour *MW* ;
- lorsque la solution n'est pas identique sur le critère principal, nous notons que le gap n'excède pas 3.24% aussi bien pour *BW* que *MW* ;
- sur le critère secondaire, les gap sont plus élevés avec deux pics pour deux combinaisons (ligne 10 et 14) pour *BW* où les gap sont de 13.33%. Pour ces mêmes combinaisons, *MW* se comportent mieux en trouvant des solutions identiques au solveur.
- 30.13% (resp. 29%) des instances sont résolues à l'optimal avec *BW* (resp. *MW*) et le gap moyen sur le premier critère est 2.37% (resp. 2.16%).

	Modèle 1						Modèle 2									
							$\epsilon = 2$					$\epsilon = 1$				
	Dep.		Comp.	Dist.	GAP	Tps	Comp.	Dist.	Dep.	Tps	Comp.	Dist.	Dep.	Tps		
	min.	max.													min.	max.
1S	12	13	7.842	553	-	1.61	7.842	553	12	13	0.39	7.842	566	12	13	0.37
1M	12	13	7.701	561	-	1.95	7.674	548	12	14	0.57	7.701	561	12	13	0.35
1L	12	13	7.701	517	-	5.15	7.668	508	12	14	2.26	7.701	517	12	13	1.36
2M	13	14	8.2	496	-	1.67	7.598	497	13	15	0.64	8.2	496	13	14	2.28
2L	13	14	7.905	495	-	1.91	7.598	460	13	15	2.81	7.905	495	13	14	5.43
3S	13	15	10.191	522	-	0.72	10.191	522	13	15	0.65	-	-	-	-	-
3M	14	15	7.766	473	-	147	7.766	473	14	15	1.59	7.766	473	14	15	2.57
3L	14	15	7.754	448	-	747	7.754	448	14	15	9.22	7.754	448	14	15	2.05
5S	14	15	6.208	497	-	2.63	6.208	497	14	15	0.39	6.208	497	14	15	0.48
5M	13	15	5.777	527	-	30.7	5.777	527	13	15	0.5	5.892	535	14	15	0.54
5L	13	15	5.68	488	-	210	5.68	488	13	15	0.70	5.795	501	14	15	1.30

Tableau 4.25 – Comparaison des modèles mathématiques - 2 types de ressource 20% d'activités synchronisées - Critère Compatibilité / Distance

Crit. 1	Crit. 2	Crit. 3	Nb types de ress.	% act. sync.	<i>BW</i>	<i>MW</i>
Comp.	Dep.	Dist.	1	10	6.18	6.19
				20	6.20	6.21
			2	10	6.22	6.23
				20	6.24	6.25
Dep.	Comp.	Dist.	1	10	6.26	6.27
				20	6.28	6.29
			2	10	6.30	6.31
				20	6.32	6.33
Dist.	Dep.	Comp.	1	10	6.34	6.35
				20	6.36	6.37
			2	10	6.38	6.39
				20	6.40	6.41
Comp.	Dist.	Dep.	1	10	6.42	6.43
				20	6.44	6.45
			2	10	6.46	6.47
				20	6.48	6.49
Dep.	Dist.	Comp.	1	10	6.50	6.51
				20	6.52	6.53
			2	10	6.54	6.55
				20	6.56	6.57
Dist.	Comp.	Dep.	1	10	6.58	6.59
				20	6.60	6.61
			2	10	6.62	6.63
				20	6.64	6.65

Tableau 4.26 – Tableau de lecture des résultats en annexe 2 - petites instances

Id	Nb de type de ress.	% act. sync.	Priorité			BW						MW					
						Objectif			GAP Moyen			Objectif			GAP Moyen		
			Comp.	Dist.	Dep.	crit. 1	crit. 2	crit. 3	crit. 1	crit. 2	crit. 3	crit. 1	crit. 2	crit. 3	crit. 1	crit. 2	crit. 3
1	1	10	1	2	3	73.33%	100%	72.73%	3.08%	-	0.87%	73.33%	100%	72.73%	2.06%	-	0.87%
2	2	20				46.67%	100%	100%	1.95%	-	-	46.67%	100%	100%	1.97%	-	-
3		10				27.27%	100%	33.33%	2.31%	-	2.24%	20%	100%	0%	2.31%	-	2.16%
4		20				27.27%	100%	66.67%	2.72%	-	0.37%	27.27%	100%	66.67%	2.72%	-	0.37%
5	1	10	1	3	2	73.33%	72.73%	100%	2.06%	0.87%	-	73.33%	72.73%	100%	2.06%	0.87%	-
6	2	20				58.33%	85.72%	100%	2.32%	0.19%	-	58.33%	85.72%	100%	1.73%	0.19%	-
7		10				42.86%	50%	100%	2.31%	1.38%	-	42.86%	50%	100%	2.31%	1.38%	-
8		20				36.36%	75%	100%	2.72%	0.37%	-	36.36%	75%	100%	2.87%	0.37%	-
9	1	10	2	1	3	66.67%	100%	60%	2.67%	-	8.75%	66.67%	100%	70%	2.67%	-	7.02%
10	2	20				66.67%	87.49%	28.58%	2.06%	13.33%	8.34%	66.67%	100%	25%	0.99%	-	6.02%
11		10				50%	100%	100%	3.24%	-	-	50%	100%	100%	3.24%	-	-
12		20				9.09%	100%	0%	1.39%	-	9.24%	9.09%	100%	0%	1.39%	-	2.05%
13	1	10	3	1	2	66.67%	100%	60%	2.67%	-	8.75%	66.67%	100%	70%	2.67%	-	7.02%
14	2	20				66.67%	87.49%	68.58%	2.06%	13.33%	8.34%	66.67%	100%	25%	0.99%	-	6.02%
15		10				50%	100%	33.34%	3.24%	-	-	50%	100%	100%	3.24%	-	-
16		20				9.09%	100%	0.0%	1.39%	-	9.24%	9.09%	100%	0%	1.39%	-	2.05%
17	1	10	2	3	1	100%	53.33%	75%	-	4.26%	2.59%	100%	53.33%	62.50%	-	5.26%	2.12%
18	2	20				100%	8.33%	100%	-	4.38%	-	100%	16.67%	0%	-	3.38%	5.02%
19		10				100%	50%	71.42%	-	3.24%	3.54%	100%	64.29%	55.55%	-	2.79%	3.71%
20		20				100%	63.64%	71.42%	-	2.12%	3.96%	100%	63.64%	57.13%	-	0.38%	2.91%
21	1	10	3	2	1	100%	46.67%	14.29%	-	2.31%	20.10%	100%	33.33%	39.99%	-	1.89%	4.59%
22	2	20				100%	33.33%	24.99%	-	1.65%	7.66%	100%	25%	0%	-	1.74%	16.23%
23		10				100%	64.29%	88.88%	-	3.89%	3.86%	100%	71.43%	60%	-	4.13%	22.66%
24		20				100%	54.55%	83.32%	-	3.08%	1.12%	100%	54.55%	83.32%	-	3.08%	9.93%

Tableau 4.27 – Synthèse des résultats sur nos instances

2.4 Résultats sur les instances de taille moyenne et grande

Nous comparons les résultats sur les instances de taille moyenne et grande obtenus avec *BW* et *MW* dans le tableau 4.28. Une ligne du tableau regroupe les résultats pour l'ensemble des instances correspondant à un nombre de types de ressource, un pourcentage d'activités synchronisées et une combinaison de critères.

De manière globale, nous constatons que les deux critères d'acceptation donnent des résultats assez proche. *MW* se détache légèrement car le pourcentage d'instances pour lequel *MW* donne de meilleures solutions (14 combinaisons d'instances sur 24) est plus important que *BW* (6 combinaisons d'instances sur 24). Cependant le gap moyen sur le premier critère est inférieur à 6% pour toutes les combinaisons d'instances.

Nb de type de ressource	%	Priorité			<i>BW</i>	<i>MW</i>	Gap moyen		
		Comp.	Dist.	Dep.			Crit. 1	Crit. 2	Crit. 3
1	10	1	2	3	46%	53%	4,55%	-	-
	20				40%	60%	5,97%	-	-
	10				27%	73%	2,49%	3,75%	-
	20				47%	53%	2,28%	-	-
2	10	1	3	2	40%	60%	2,81%	-	-
	20				53%	47%	5,91%	-	-
	10				50%	50%	1,69%	0%	2,00%
	20				50%	50%	3,66%	-	-
1	10	2	1	3	47%	53%	1,66%	7,82%	-
	20				67%	33%	1,36%	-	-
	10				43%	57%	0,88%	6,47%	-
	20				50%	50%	2,05%	11,66%	-
2	10	3	1	2	40%	60%	1,17%	2,5%	9,45%
	20				60%	40%	3,38%	-	-
	10				43%	57%	0,52%	-	-
	20				27%	73%	2,58%	-	-
1	10	2	3	1	33%	67%	0,47%	8,80%	-
	20				40%	60%	0,92%	7,18%	-
	10				50%	50%	0%	7,55%	-
	20				42%	58%	2,20%	7,66%	-
2	10	3	2	1	53%	47%	1,03%	3,56%	-
	20				53%	47%	0,39%	2,66%	-
	10				57%	43%	0,48%	3,46%	-
	20				45%	55%	1,21%	4,67%	-

Tableau 4.28 – Résultats obtenus sur les instances de taille moyenne et grande

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par décrire les méthodes approchées utilisées en insistant sur les métaheuristiques basées individu ainsi que les méthodes hybrides. Ce chapitre se poursuit avec les deux propositions de couplage, la première basée sur une représentation indirecte d'une solution, approche classique présentée par Taillard (2002) et le second avec une représentation directe que nous proposons. À ces deux codages de solutions sont associés deux systèmes de voisinage ainsi qu'une heuristique d'affectation et de calcul des dates ou un modèle de simulation. Ce modèle de simulation permet également de calculer les dates de début des activités mais également de vérifier l'absence de cycle dans une solution. Cela nous amène naturellement aux méthodes d'optimisation utilisées : le recuit simulé et la recherche locale itérée avec trois critères d'acceptation *Random Walk* (*RW*), *Better* (*BW*) et *Metropolis Walk* (*MW*).

Les premières expérimentations ont permis d'écarter la représentation indirecte d'une solution qui donnaient des résultats de moins bonne qualité. Dans la littérature, Bredström et Rönnqvist (2008) ont travaillé sur un problème d'organisation de soins à domicile avec des contraintes de synchronisation avec des critères proches des nôtres. Les auteurs nous ayant fournis leurs instances, nous avons adapté notre méthode de résolution à leur problème pour en mesurer l'efficacité. Les premières conclusions ont été l'abandon du recuit simulé que nous ne sommes pas arrivés à régler pour qu'il soit efficace sur ce problème (la variation de la fonction objectif entre une solution admissible et une solution non admissible rendant l'espace de recherche chaotique) et du critère d'acceptation *RW*. Toujours sur les instances de la littérature, nous avons amélioré des bornes supérieures pour 44 instances (sur 100) de toute taille et chacun des critères de performance.

Pour terminer, nous avons adapté ces instances en intégrant des types de ressources, en ajoutant des niveaux de dépendance et en augmentant la part d'activités synchronisées afin de tester nos méthodes sur notre problème. La résolution avec le solveur Cplex a permis d'avoir une borne inférieure en résolvant le premier modèle mathématique présenté dans le chapitre 3. Sans surprise, l'augmentation du nombre du type de ressource et du pourcentage d'activités synchronisées rend la résolution plus difficile. Cependant lorsque le critère principal est l'équilibrage suivant le niveau de dépendance des patients, la valeur du premier critère de la solution du couplage est identique à celui de la solution du solveur pour toutes les instances. Il est également à noter qu'environ 30% des instances ont été résolues à l'optimal avec le couplage et lorsque la valeur du critère prioritaire n'est pas identique à celle trouvée avec le solveur, l'écart ne dépasse pas 3.24%.

Pour terminer, il serait intéressant de tester nos couplages sur d'autres instances de la littérature ainsi que des instances réelles.

Chapitre 5

Pistes de recherche : réorganisation de tournées, incertitude et localisation de sites

Sommaire

Introduction	130
I Réorganisation des tournées de soins	130
1 Description du problème	130
2 Proposition de résolution à l'aide d'une métaheuristique	131
2.1 Codage d'une solution	131
2.2 Pré-traitement	132
2.3 Système de voisinage	132
2.4 Fonction objectif	133
2.5 Construction d'une solution initiale	133
2.6 Algorithme d'optimisation	133
3 Premiers résultats	134
II Prise en compte de temps de transport stochastiques	136
1 Définition de la robustesse	136
2 Évaluation de la robustesse de la solution obtenue avec une résolution déterministe	137
3 Optimisation suivant la robustesse des solutions	138
III Localisation de sites	141
1 Modèles de base	141
1.1 k -median problem, noté k -median - Kuehn et Hamburger (1963)	141
1.2 Uncapacitated Plant Location Problem, noté $UPLP$ - Erlenkotter (1978)	142
1.3 Capacitated Plant Location Problem, noté $CPLP$ - Sá (1969)	142
2 Modèle mono-échelon multi-période	142
3 Ébauche de démarche de résolution	144
Conclusion	145

Introduction

Les trois thématiques que nous abordons ici ne sont que partiellement traitées. Nous présentons des premiers résultats expérimentaux pour la réorganisation de tournées et une étude de l'impact de temps de transport stochastiques sur la réalisation des tournées. Il faudrait une étude de la littérature plus conséquente afin de poser les bases scientifiques de notre étude. Concernant la localisation, nous avons au contraire réalisé un état de l'art mais nous n'avons pas poursuivi par une étude expérimentale.

Dans les deux chapitres précédents, nous avons présenté le modèle de connaissance puis les modèles d'action réalisés pour la construction de tournées de soins à domicile. Cependant, nous ne répondons pas à toutes les attentes formulées dans le chapitre 3 section II comme la réorganisation des tournées suite à l'absence d'une ressource (à cause de maladie, congés, ...). La première partie de ce chapitre présente une approche pour satisfaire cette demande. Celle-ci est basée sur une résolution approchée.

La résolution proposée dans le chapitre 4 est réalisée en contexte déterministe. Nous nous sommes donc intéressés aux facteurs extérieurs qui pourraient intervenir lors de la réalisation des tournées comme par exemple l'aléa engendré par la circulation lors de déplacement en voiture. La seconde partie de ce chapitre aborde cet aspect. Elle débute par l'évaluation des retards des solutions obtenues en contexte déterministe lorsque les durées de transport sont soumises à des aléas. Ensuite, nous proposons une approche de résolution intégrant la robustesse comme critère de performance.

Enfin, pour terminer ce chapitre, nous nous intéressons à une problématique née du partenariat entre l'Agence Régionale de Santé (ARS) d'Auvergne et le LIMOS. Ce partenariat a pour but, entre autres, de travailler sur le parcours de la personne âgée en Auvergne. Certains territoires auvergnats n'offrent pas suffisamment de service de soins infirmiers à domicile et cette absence fait défaut pour le maintien à domicile des personnes âgées. Ainsi, dans le cadre de ce partenariat, il serait intéressant d'identifier les zones où installer des SSIAD pour couvrir au mieux la population auvergnate et plus particulièrement les personnes âgées, cible privilégiée des SSIAD. La troisième partie de ce chapitre aborde ce problème. Il débute par un état de l'art sur les problèmes de localisation mono-échelon et se termine par la proposition d'une approche de résolution.

I Réorganisation des tournées de soins

Lors de nos rencontres, le cadre de santé, responsable de l'organisation des tournées du SSIAD de Montluçon, a expliqué devoir régulièrement réorganiser les tournées le matin, dans un temps très court, en cas d'absence d'une ressource.

1 Description du problème

L'objectif est de réaffecter au mieux les activités réalisées initialement par la ressource r_0 dans les tournées des ressources disponibles. Nous devons donc réorganiser les tournées construites au préalable en évitant de les modifier. Par conséquent, certaines activités risquent de ne pas respecter les fenêtres de temps. Ainsi, il nous est paru naturel de minimiser le non respect des dates de début au plus tard des activités. Les hypothèses sont donc :

- une seule ressource est absente ;
- les tournées des ressources présentes sont conservées, elles servent de données d'entrée à la méthode de résolution ;
- une activité qui ne peut être réalisée que par une ressource absente ne sera pas affectée à une autre tournée, le coordinateur pourra faire appel, par exemple, à une ressource libérale.

Pour décrire le problème, les données et notations du chapitre 3 sont conservées. Elles sont complétées par les notations suivantes :

- r_0 : la ressource absente,
- A_{r_0} : l'ensemble des activités, compatibles avec au moins une ressource présente, réalisées par la ressource r_0 ,
- ϕ_0 : tournées réalisées par les ressources disponibles,
- $nbAct_k$: nombre d'activités réalisées par la ressource $k \in R$.

2 Proposition de résolution à l'aide d'une métaheuristique

Pour réutiliser une partie des fonctions développées pour l'organisation des tournées, nous utilisons à nouveau une recherche locale itérée pour aborder ce problème. Le cheminement suivi est identique au chapitre 4, nous présentons le codage d'une solution, puis les systèmes de voisinage et enfin la fonction objectif.

2.1 Codage d'une solution

Une solution est une matrice ψ composée de 3 lignes et $|A_{r_0}|$ colonnes. Les éléments de la première ligne (ψ_{1i}), $i \in \{1, \dots, |A_{r_0}|\}$ représentent les activités à réaffecter. Les éléments de la deuxième ligne (ψ_{2i}), $i \in \{1, \dots, |A_{r_0}|\}$ représentent la ressource à laquelle est réaffectée l'activité ψ_{1i} . Enfin, les éléments de la troisième ligne définissent la position à laquelle est insérée l'activité ψ_{1i} dans la tournée de la ressource ψ_{2i} . Ainsi on peut déduire ϕ qui représente les tournées des ressources disponibles après réaffectation des activités de A_{r_0} .

Envisageons un problème à quatre ressources (les ressources r_1 , r_2 et r_3 sont de type 1 et la ressource r_4 est de type 2) et dix activités à réaliser dont trois qui nécessitent deux ressources. Le type de ressource requis pour réaliser chaque activité est indiqué dans la figure 5.1. La construction des tournées avec les

activité	ressource			tournées			
	nb requis	type 1	type 2	r_1	r_2	r_3	r_4
1	1	✓	✓	3	6	10	3
2	1	✓		4	2	6	7
3	2	✓	✓	9	8	8	5
4	1	✓					1
5	1		✓				
6	2	✓					
7	1	✓	✓				
8	2	✓					
9	1	✓					
10	1	✓					

Figure 5.1 – Résumé des données et solution de l'exemple - réorganisation des tournées de soins

quatre ressources disponibles donne une solution décrite avec les données de l'exemple dans la figure 5.1.

En supposant que la ressource r_4 est absente ($r_0 = r_4$), $A_{r_0} = \{1, 3, 7\}$ car l'activité 5 n'est pas compatible avec les ressources disponibles. Une solution du problème de réorganisation ψ est une matrice 3×3 (cf. figure 5.2) dans laquelle l'activité 1 est insérée en troisième position dans la tournée de la ressource r_3 , l'activité 3 en quatrième position de la tournée de la ressource r_2 et l'activité 7 en troisième position de la tournée de la ressource 3. L'activité 3 est une activité synchronisée, elle ne peut pas être affectée à la ressource r_1 car cette ressource lui est déjà affectée.

ψ		
1	3	7
3	2	2
3	4	3

Figure 5.2 – Exemple - Codage d'une solution - réorganisation de tournées

2.2 Pré-traitement

En amont de la résolution, nous effectuons un pré-traitement qui consiste à déterminer, pour chaque activité $i \in A_{r_0}$, l'ensemble des ressources RC_i qui peuvent réaliser l'activité i c'est-à-dire les ressources compatibles avec l'activité i et les ressources qui ne sont pas déjà affectées à l'activité i (pour les activités synchronisées). Cet ensemble est défini par $RC_i = \{k \in R / C_{ik} > 0 \text{ et } \phi_{jk} \neq i, \forall j \in \{1, \dots, nbAct_k\}\}$. Les ensemble RC_i , $i \in A_{r_0}$ sont déterminés à l'aide de l'algorithme 17.

Algorithme 17 : Déterminer l'ensemble RC_i , $i \in A_{r_0}$

```

boolean : flag
 $RC_i = \emptyset, \forall i \in A_{r_0}$ 
for  $k \in R / k \neq r_0$  do
  for  $i \in A_{r_0}$  do
    if  $C_{ik} > 0$  then
      if  $nb_i = 2$  then
        flag  $\leftarrow true$ 
        for  $j \in \{1, \dots, nbAct_k\}$  do
          if  $\phi_{jk} = i$  then
            flag  $\leftarrow false$ 
          end
        end
      end
    end
    if flag = true then
       $RC_i = RC_i \cup k$ 
    end
  end
end
end

```

2.3 Système de voisinage

Nous utilisons deux systèmes de voisinage qui sont proches du concept de mutation des algorithmes génétiques. Le premier système de voisinage, noté V_1 , consiste à modifier la position de l'activité sans modifier la ressource. Le principe de ce voisinage est donné par l'algorithme 18.

Algorithme 18 : Voisinage V_1 - Réorganisation de tournées

1. choisir aléatoirement et uniformément $i/i \leq |A_{r_0}|$
 2. choisir aléatoirement et uniformément une position $p/p \leq nbAct_{\psi_{2i}}$
 3. $\psi_{3i} = p$
 4. insérer l'activité ψ_{1i} en position ψ_{3i} dans ϕ_0
 5. $nbAct_{\psi_{2i}} \leftarrow nbAct_{\psi_{2i}} + 1$
-

Le second système de voisinage, noté V_2 , consiste à modifier la ressource sans modifier la position

dans la tournée. Cependant, si l'activité est dans une position non disponible dans la tournée de la nouvelle ressource, elle sera insérée en fin de tournée. Cela se produit, par exemple, lorsqu'une activité en position 8 d'une tournée doit être insérée dans une tournée ne contenant que six activités. Alors, l'activité sera insérée en fin de tournée, soit en position 7. L'algorithme 19 donne le principe de ce système de voisinage.

Algorithme 19 : Voisinage V2 - Réorganisation de tournées

1. choisir aléatoirement et uniformément une activité $i/i \leq |A_{r_0}|$
 2. choisir aléatoirement et uniformément une ressource $k \in RC_{\psi_{1i}}$
 3. $\psi_{2i} = k$
 4. **if** $\psi_{3i} > nbAct_{\psi_{2i}}$ **then**
 | $\psi_{3i} \leftarrow nbAct_{\psi_{2i}} + 1$
end
 5. insérer l'activité i en position ψ_{3i} dans la tournée ϕ_0
 6. $nbAct_{\psi_{2i}} \leftarrow nbAct_{\psi_{2i}} + 1$
-

2.4 Fonction objectif

Comme pour la résolution du problème présenté dans le chapitre 4, l'application d'un système de voisinage peut conduire à la création d'un circuit dans la solution. Le modèle de simulation, présenté dans le chapitre précédent, permet à nouveau de détecter la présence de circuit. Le critère de performance retenu, noté TW_{NR} , est lié au dépassement des fenêtres de temps de disponibilité des patients. Il est calculé par la formule de l'équation (5.1). Pour rappel, z_i est la date de début de l'activité i et e_i la date de début au plus tard de l'activité i .

$$TW_{NR} = \sum_{i \in A} \max(0; z_i - e_i) \quad (5.1)$$

2.5 Construction d'une solution initiale

Pour initialiser l'optimisation, une solution initiale est construite aléatoirement. Chaque activité i est affectée aléatoirement et uniformément à une ressource disponible appartenant à RC_i . Ensuite, la position est choisie aléatoirement et uniformément suivant le nombre d'activités présentes dans cette tournée. L'algorithme 20 donne la démarche de construction d'une solution initiale. $rnd()$ est une fonction qui renvoie un nombre réel aléatoirement et uniformément choisi entre 0 (inclus) et 1 (exclu).

Algorithme 20 : Construction d'une solution initiale

- for** *pour tout élément* ψ_{i1} **do**
 Choisir aléatoirement et uniformément une ressource $k \in RC_{\psi_{i1}}$
 $\psi_{i2} = k$
 $\psi_{i3} = \lfloor nbAct_{\psi_{i2}} \cdot rnd() \rfloor + 1$
end
-

2.6 Algorithme d'optimisation

Pour résoudre ce problème, nous proposons un couplage métaheuristique-simulation dont l'algorithme 21 présente le principe. La métaheuristique utilisée est une recherche locale itérée, le modèle de simulation est décrit dans le chapitre 4. Le modèle de simulation sert à calculer les dates de début et évaluer le

critère de performance. Le critère d'acceptation utilisé dans la recherche locale itérée est *Better(BW)*. Les deux systèmes de voisinage ont la même probabilité d'être choisis à chaque itération de la phase d'optimisation. La phase de diversification est assurée par l'application de quatre fois le système de voisinage V2. Les notations utilisées sont les suivantes :

- x et y : deux solutions
- H_x : évaluation de la solution x calculée par l'équation (5.1) et réalisée par le modèle de simulation
- x_{rec} : solution record
- $nbIter$: nombre d'itérations
- $nbEchec$: nombre d'itérations sans amélioration
- $palier$: nombre maximum d'itérations sans amélioration
- $simu(x)$: appel au modèle de simulation. Il renvoie ∞ si la solution n'est pas réalisable, l'évaluation de la solution sinon.

Algorithme 21 : Optimisation - réorganisation des tournées de soins

```

 $x \leftarrow$  solution initiale (algorithme 20)
Construire  $\phi$  pour la solution  $x$ 
 $H_x \leftarrow simu(\phi)$ 
for  $i \leftarrow 1$  to  $nbIter$  do
     $nbEchec \leftarrow 0$ 
    while  $nbEchec < palier$  do
        if  $rnd() < \frac{1}{2}$  then
             $y \leftarrow V_1(x)$ 
        else
             $y \leftarrow V_2(x)$ 
        end
        Construire  $\phi$  pour la solution  $y$ 
         $H_y \leftarrow simu(\phi)$ 
        if  $H_y \leq H_x$  then
             $x \leftarrow y$ 
             $H_x \leftarrow H_y$ 
             $nbEchec \leftarrow 0$ 
        else
             $nbEchec \leftarrow nbEchec + 1$ 
        end
         $i \leftarrow i + 1$ 
    end
    if  $H_x < H_{x_{rec}}$  then
         $x_{rec} \leftarrow x$ 
         $H_{x_{rec}} \leftarrow H_x$ 
    else
         $x \leftarrow x_{rec}$ 
         $H_x \leftarrow H_{x_{rec}}$ 
    end
    for  $j \leftarrow 1$  to 4 do
         $x \leftarrow V_2(x)$ 
    end
end

```

3 Premiers résultats

Des tests ont été effectués sur les petites instances 1S, 1M et 1L et les instances moyennes 5S, 5M et 5L. Chaque instance est utilisée avec un et deux types de ressources, 10% et 20% d'activités

synchronisées. Le temps de résolution est d'environ 10 secondes. N'ayant pas de référence pour évaluer les résultats, nos premiers tests expérimentaux ont consisté à comparer le retard de la solution initiale avec la solution obtenue à la fin de la résolution. Dans chaque cas, nous regardons le retard total, le plus petit retard et le plus grand retard ainsi que le nombre d'activités en retard. Les retards sont exprimés en minute. La ressource absente est choisie aléatoirement.

Inst.	Nb type ress.	% act sync.	Heuristique de construction				Méthode proposée			
			Ret. tot.	Ret. min.	Ret. max.	Nb ret.	Ret. tot.	Ret. min.	Ret. max.	Nb ret.
1S	1	10	6356	190	1037	13	22	1	9	5
		20	7304	408	928	13	70	2	37	4
	2	10	1743	1	339	11	34	2	30	3
		20	2852	30	728	12	87	2	47	4
1M	1	10	1066	17	253	7	3	1	3	3
		20	3310	249	510	8	23	6	10	3
	2	10	1576	20	479	10	0	0	0	0
		20	1116	26	362	6	50	50	50	1
1L	1	10	1033	29	455	6	0	0	0	0
		20	852	21	395	6	25	25	25	1
	2	10	1024	5	556	6	30	30	30	2
		20	2257	63	670	8	104	5	75	3
5S	1	10	3299	86	552	13	50	2	44	3
		20	9905	8	769	26	59	4	15	7
	2	10	7288	8	739	17	138	8	55	6
		20	2260	14	489	17	416	6	107	11
5M	1	10	1252	2	584	7	0	0	0	0
		20	1429	24	215	12	43	6	29	3
	2	10	712	9	321	8	0	0	0	0
		20	10623	1995	612	26	288	1	69	9
5L	1	10	1427	5	147	7	0	0	0	0
		20	2618	59	539	17	0	0	0	0
	2	10	1820	65	237	9	0	0	0	0
		20	1997	82	357	11	0	0	0	0

Bien que la solution initiale ne soit pas une bonne référence, nous constatons que l'application de notre méthode permet d'obtenir une solution avec peu de retards sur les dates de début des activités. Le nombre d'activités en retard ainsi que le retard maximum diminue également. Sur les deux instances *S*, les retards sont plus importants. Les fenêtres de temps les plus courtes rendent forcément plus difficile la réorganisation. Enfin, l'augmentation du pourcentage d'activités synchronisées dégrade le critère de retard car elle augmente le nombre de trajets à effectuer par les ressources.

Étant donnés les faibles temps de résolution, une autre solution consisterait à relancer une construction complète des tournées avec une ressource en moins. Nous avons comparé la solution obtenue en organisant les tournées avec une ressource absente (méthode chapitre 4) et la solution obtenue après réorganisation avec la même ressource absente (méthode chapitre 5). Cinq réplifications ont été réalisées sur une instance. Les résultats sont dans le tableau 5.1, chaque ligne correspond à une réplification. Nous constatons que l'organisation avec une ressource en moins permet d'obtenir des retards inférieurs (73 pour 291 dans le meilleur des cas). Cependant, la réorganisation permet de conserver l'organisation initialement prévue et ne remet pas en cause l'affectation des ressources aux patients. Cet aspect peut entrer en ligne de compte dans la gestion des ressources de la structure.

Dans cette partie, nous avons proposé une méthode de résolution pour la réorganisation de tournées

Méthode chapitre 4				Méthode chapitre 5			
nb activités en retard	retard min.	retard max.	retard total	nb activités en retard	retard min.	retard max.	retard total
5	10	39	107	10	1	112	291
4	13	29	73	10	1	112	291
4	13	29	73	10	1	112	291
5	10	39	107	10	1	112	291
5	10	39	107	10	1	112	291

Tableau 5.1 – Comparaison approche organisation / réorganisation

de soins à domicile en cas d'absence d'une ressource. Les nouvelles tournées sont construites en conservant les tournées initiales des ressources disponibles. Les premiers résultats montrent des résultats intéressants qui nécessitent, bien sûr, des expérimentations plus complètes.

II Prise en compte de temps de transport stochastiques

Après avoir proposé une méthode pour l'organisation des tournées de soins en contexte déterministe, nous souhaitons évaluer la robustesse des solutions aux aléas. Dans un état de l'art publié en 2013, Pillac et al. (2013) distinguent trois catégories pour les problèmes de tournées de véhicules en contexte incertain :

- **client stochastique** : un client dans une ville a besoin d'un service suivant une probabilité donnée ;
- **temps stochastique** : le temps de transport ou les temps de service dans chaque ville sont modélisés par une variable aléatoire ;
- **demande stochastique** : la demande est modélisée par une variable aléatoire.

Dans le cadre de la construction de tournées de soins à domicile, les patients à visiter et les soins à réaliser sont connus. En cas d'urgence, l'infirmier coordinateur fait intervenir les services d'urgence ou une ressource libérale. En revanche, l'aléa peut intervenir dans le temps de réalisation des activités ou dans les temps de transport entre les domiciles des patients. Nos travaux se situent donc dans la catégorie temps stochastique. Nous avons choisi d'intégrer l'incertitude sur les temps de transport et de considérer plusieurs cas : les temps de transport suivent une loi normale de moyenne égale au temps déterministe et d'écart-type 10%, 20%, 30 % et 40% de la moyenne.

La première partie consiste à définir la notion de robustesse et à déterminer le critère de robustesse que nous utilisons. Ensuite, nous évaluons la robustesse des solutions obtenues lors de la résolution en contexte déterministe avec la méthode vue dans le chapitre 3. Pour terminer, la troisième partie consiste à construire une solution en intégrant la robustesse dans les critères de performance.

1 Définition de la robustesse

La robustesse est une notion qui possède différentes définitions dans la littérature. Nous avons choisi la définition de Roy (2005) qui la décrit comme

l'aptitude à résister à des « à peu près » ou des « zones d'ignorances » afin de se protéger d'impacts jugés regrettables, notamment la dégradation de propriétés à préserver.

Le critère, noté *Rob*, pour évaluer la robustesse est la moyenne de la somme des retards évaluée sur plusieurs réplifications. Il est calculé suivant la formule 5.2. Soit *nbRep* le nombre de réplifications

réalisées. z_{ip} est la date de début de l'activité $i \in A$ dans la réplication $p \in \{1, \dots, nbRep\}$.

$$Rob = \frac{\sum_{p=1}^{nbRep} \sum_{i \in A} \max(z_{ip} - e_i; 0)}{NbRep} \quad (5.2)$$

Le nombre de réplifications à réaliser pour que l'évaluation soit pertinente a été déterminé expérimentalement. Pour cela, nous réalisons dix mille réplifications de l'instance 6S (45 activités, amplitude des fenêtres de temps les plus petites, deux types de ressource et 20% d'activités synchronisées). Après chaque réplication la moyenne de la somme des retards est calculée. Cela a permis de construire le graphique de la figure 5.3 avec en abscisse le nombre de réplifications et en ordonnée la moyenne de la somme des retards (courbe 1 : $\sigma = 10\%.\bar{x}$, courbe 2 : $\sigma = 20\%.\bar{x}$, courbe 3 : $\sigma = 30\%.\bar{x}$, courbe 4 : $\sigma = 40\%.\bar{x}$). D'après le graphique, nous considérons que la courbe 1 a un comportement asymptotique

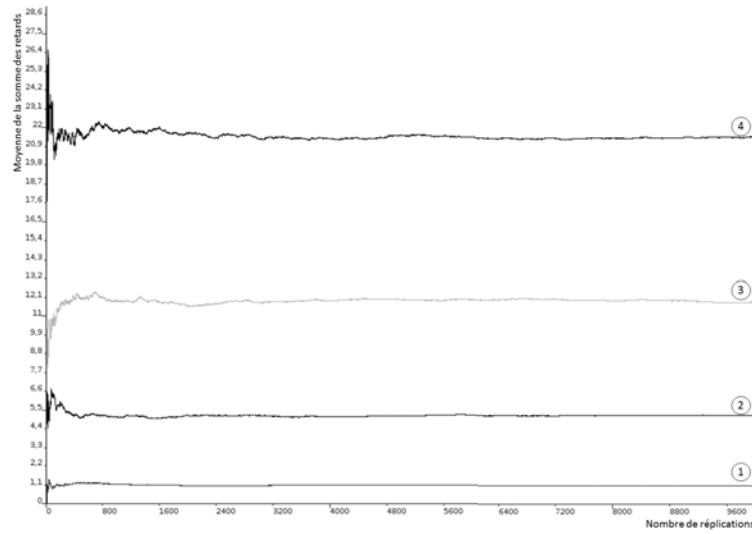


Figure 5.3 – Évolution de la moyenne de la somme des retards suivant le nombre de réplifications

à partir de 3200 réplifications. Les courbes 2 et 3 nécessitent environ 4000 réplifications et la courbe 4 6000 réplifications. Ces valeurs vont nous permettre de travailler dans le cadre d'une première étude. Dans des travaux ultérieurs, il sera nécessaire de réaliser une étude plus fine en travaillant sur plusieurs instances par exemple et ne pas se limiter à une lecture graphique.

2 Évaluation de la robustesse de la solution obtenue avec une résolution déterministe

Dans un premier temps, nous nous sommes concentrés sur les temps de transport modélisés par une loi normale $\mathcal{N}(\bar{x}, 0.3\bar{x})$. La solution au problème d'organisation des tournées de soins en contexte déterministe est obtenue à partir du couplage proposé dans le chapitre précédent (critère d'acceptation *BW*). L'algorithme 22 décrit la procédure que nous avons suivie. Les notations utilisées sont :

- \bar{x} est une solution obtenue avec une résolution en contexte déterministe.
- \widehat{D}_{ij} est le temps de transport entre les activités i et j intégrant un aléa
- η est un réel tiré aléatoirement suivant une loi normale centrée réduite
- les variables réelles $retard_p, p \in \{1, \dots, nbRep\}$ correspondent à la somme des retards de la réplication p

Algorithme 22 : Évaluation de la robustesse d'une solution x

```

for  $p \leftarrow 1$  to  $nbRep$  do
    Choisir aléatoirement  $\eta$  suivant une loi normale centrée réduite
     $\forall (i, j) \in A^2, \widehat{D}_{ij} = D_{ij} \cdot (\frac{30}{100} \cdot \eta + 1)$  // Construction de la matrice des distances intégrant l'aléa
     $retard_p(x) \leftarrow$  évaluation de la somme des retards de la solution  $x$  de la réplication  $p$  avec le
    modèle de simulation
end

 $Rob(x) \leftarrow \frac{\sum_{p=1}^{nbRep} retard_p(x)}{nbRep}$ 

```

L'algorithme 22 nous permet d'évaluer la robustesse d'une solution obtenue en contexte déterministe. Pour cette expérimentation, nous avons choisi les instances $6S$ et $7S$ avec la durée des tournées comme critères principal. Le modèle de simulation proposé dans le chapitre 4 permet d'évaluer le retard engendré par les temps de transport stochastiques. Les instances S ont les fenêtres de temps les plus courtes parmi nos instances. Nous les avons choisies pour nous placer dans la situation la moins favorable et observer l'impact des temps de transport stochastiques. La simulation est faite sur 4000 réplifications. La moyenne des durées des tournées est 1121 (resp. 1032) pour une robustesse de 22,05 (13,73) pour l'instance $6S$ (resp. $7S$). Le détail des cinq exécutions est dans le tableau 5.2. Les solutions sont assez robustes avec 13 à 22 minutes de retard en moyenne (sur 45 activités) suivant les instances.

3 Optimisation suivant la robustesse des solutions

La méthode que nous proposons est la recherche locale itérée décrite dans le chapitre 4 avec le critère d'acceptation *Better (BW)*. Le principe de cette résolution est le suivant : la recherche locale est faite en contexte déterministe. Le changement réside dans le critère d'acceptation. La robustesse du minimum local obtenu au terme de la recherche locale est évaluée en effectuant 4000 réplifications de la solution. L'algorithme 23 décrit notre méthode, les notations sont les suivantes :

- $H(x)$ est la valeur de la fonction objectif calculée avec la formule 4.4 (chapitre 4 section 3)
- $Rob(x)$ est l'évaluation de la robustesse de la solution x (cf. algorithme 22)

Le nombre d'itérations de la recherche locale itérée est 2.5 millions, le palier est 750. La solution est conservée si la moyenne de la somme des retards est améliorée. Cinq exécutions ont été réalisées avec les instances $6S$ et $7S$. Les résultats se trouvent dans le tableau 5.2.

Pour les deux instances, nous constatons que la résolution en intégrant l'aléatoire permet d'obtenir des solutions plus robustes (80 % et 56%). En contrepartie, les durées de tournées sont supérieures (3% et 9%).

Nous avons ensuite isolé l'ensemble des minima locaux qui respectent toutes les contraintes du problème déterministe. Cela permet de tracer un graphique (cf. figure 5.4) où la durée des tournées est en abscisse et la robustesse en ordonnée. Bien que le nombre de solutions représenté soit faible (90 dans cet exemple sur une instance $7S$), nous voyons apparaître un front de Pareto (composé de six solutions sur cet exemple) de rang 1. Cela permet au décideur de faire un choix parmi plusieurs solutions suivant le critère qu'il juge le plus pertinent pour sa structure (des tournées plus courtes mais sensibles aux aléas ou des tournées plus longues mais robustes).

Pour terminer cette partie, nous pouvons dire que la spécificité du problème, avec des fenêtres de temps d'amplitude assez importantes (entre 1.3 et 1.8 heures pour les instances S) fait que l'application de temps de transport stochastique n'entraîne pas des retards très importants pour les patients. La prise en compte de la robustesse dans l'optimisation permet d'obtenir des solutions plus robustes au détriment de la durée des tournées.

Algorithme 23 : Optimisation - prise en compte de temps de transport stochastiques

```

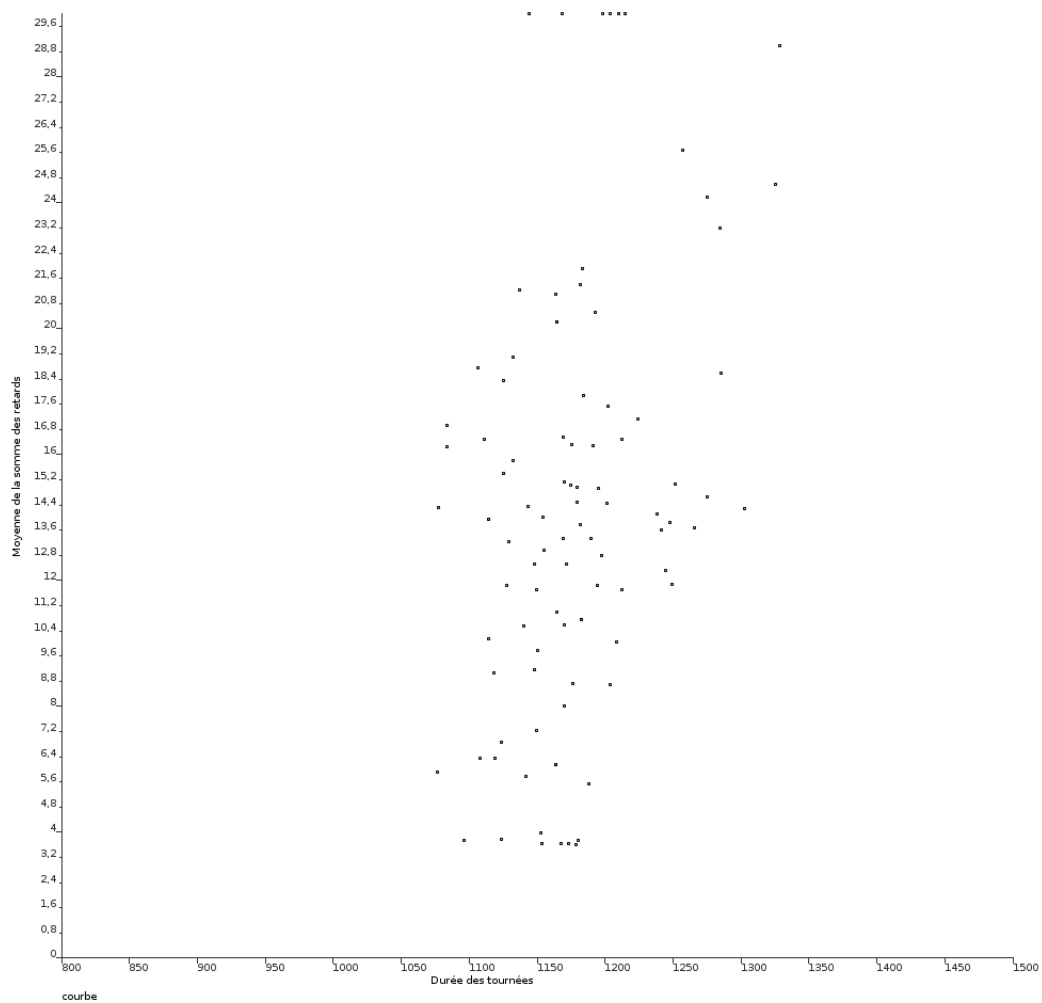
for  $i \leftarrow 1$  to  $nbIter$  do
   $nbEchec \leftarrow 0$ 
  while  $nbEchec < palier$  do
     $y \leftarrow I_2(x)$  // Voisinage insertion défini dans le chapitre 4 section III
     $H(y) \leftarrow simul(y)$  // Faisabilité, calcul des dates de débuts et évaluation
    if  $H(y) \leq H(x)$  then
       $x \leftarrow y$ 
       $nbEchec \leftarrow 0$ 
    else
       $nbEchec \leftarrow nbEchec + 1$ 
    end
     $i \leftarrow i + 1$ 
  end
  // la robustesse de la solution  $x$ ,  $Rob(x)$ , est évaluée à l'aide de l'algorithme 22
  if  $Rob(x) < Rob(x_{rec})$  then
     $x_{rec} \leftarrow x$ 
  else
     $x \leftarrow x_{rec}$ 
  end
  for  $j \leftarrow 1$  to 4 do
     $x \leftarrow P_2(x)$  // Diversification en appliquant 4 fois  $P_2$  sur la solution record
  end
end

```

Dans la littérature, des travaux traitent les problèmes de tournées de véhicules en contexte stochastique en définissant une distribution des vitesses de déplacement suivant les heures de la journée comme le font Lecluyse et al. (2009) par exemple. Cela est peut-être une meilleure représentation des temps de transport que la loi normale que nous avons choisie de suivre. Ensuite, il est sans doute pertinent d'intégrer également la durée des activités comme des données stochastiques. En effet, la visite d'un soignant au domicile d'un patient est décomposée en deux temps, le premier, temps technique, pour la réalisation des soins et le second, temps social, pour discuter avec le patient. Il est difficile d'évaluer précisément ce second temps, tant il dépend de l'état psychologique du patient.

Instance	Résolution en contexte déterministe		Résolution en contexte stochastique	
	Durée des tournées	Robustesse	Durée des tournées	Robustesse
6 <i>S</i>	1097	23.41	1123	2.97
	1103	19.82	1131	3.83
	1108	15,91	1116	5.71
	1091	25.22	1114	3.67
	1079	12.63	1169	3.35
moyenne	1095	19.40	1130.6(+3%)	3.74(-80%)
7 <i>S</i>	1045	9.58	1083	4.01
	1031	13.07	1136	9.20
	1036	18.92	1208	3.38
	1033	9.44	1120	9.60
	1016	17.64	1083	4.01
moyenne	1032	13.73	1126 (+9%)	6.04 (-56%)

Tableau 5.2 – Robustesse des solutions

Figure 5.4 – Minima locaux, instance 7*S*

III Localisation de sites

Des premiers travaux ont porté sur les problèmes de localisation de sites en contexte industriel. Nous avons réalisé un état de l'art assez complet sur les problèmes de localisation qui a fait l'objet d'une publication et une présentation en conférence. Cet état de l'art est centré sur la conception d'une chaîne logistique. De nombreux travaux introduisent des modèles multi-échelon qui ne sont pas pertinents dans le cadre de structures de maintien à domicile. Nous avons fait le choix de ne présenter dans ce mémoire que les modèles mono-échelon. L'article complet est présent dans l'annexe 3.

Selon Ambrosino et Scutellà (2005), les problèmes de conception de réseaux (ou de localisation de sites) consistent à trouver la meilleure route pour transférer les produits des fournisseurs vers les clients en déterminant la structure du réseau tout en minimisant le coût global. Un réseau logistique est composé d'un certain nombre de sites sur lesquels une installation (fournisseur, site de production, plateforme de stockage, site de distribution) peut être ouverte. Les sites sont reliés entre eux par des routes sur lesquelles transitent les flux de produits. Dans la littérature, Martel (2005) a identifié deux modélisations de réseaux logistiques :

- un **réseau logistique général** composé de différentes entités (fournisseur, site de production, plateforme de stockage, site de distribution) reliées entre elles,
- un **réseau logistique échelonné** dans lequel les entités sont hiérarchisées et les routes existent uniquement entre des entités de niveaux successifs.

Ces problèmes ont fait l'objet d'un état de l'art extrêmement détaillé par Melo et al. (2009). Cependant, les auteurs n'abordent ni les coûts ni la structure des réseaux logistiques étudiés. Dans notre papier, nous proposons une classification et une notation pour ces problèmes. La classification est réalisée suivant deux critères, mono ou multi-période et le nombre d'échelons considéré (mono-échelon ou multi-échelon). La notation permet de visualiser la structure du réseau logistique, les règles de gestion à l'intérieur du réseau ainsi que les critères de performance considérés dans les modèles de la littérature. Les modèles de base sont ensuite présentés ainsi que les méthodes de résolution et les instances utilisées.

1 Modèles de base

Ces modèles sont mono-période, mono-produit, mono-échelon. Les modèles mono-échelon sont particulièrement intéressants dans le contexte des structures de maintien à domicile. En effet, il faut localiser les structures de soins connaissant la localisation des patients, ce qui correspond à une structure mono-échelon.

1.1 *k*-median problem, noté *k-median* - Kuehn et Hamburger (1963)

Parmi un ensemble de sites disponibles (noté I) et connaissant la localisation de l'ensemble des clients (noté J), l'objectif est de choisir k sites à ouvrir afin de servir tous les clients en minimisant la somme des coûts de distribution et les coûts d'ouverture. Les auteurs font l'hypothèse qu'un client est livré par un seul site et les sites sont à capacité infinie.

Les coûts de distribution entre les sites et les clients sont notés c_{ij} , et les coûts d'ouverture sont notés o_i , $\forall i \in I$. Les variables de décisions sont :

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le client } j \in J \text{ est livré par le site } i \in I \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$u_j = \begin{cases} 1 & \text{si le site } j \in J \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Les contraintes du modèle sont :

$$\sum_{j \in J} u_j = k \quad (5.3)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \quad (5.4)$$

$$x_{ij} - u_j \leq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (5.5)$$

$$(x_{ij}, u_j) \in \{0, 1\}^2 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (5.6)$$

La contrainte (5.3) vérifie qu'exactement k sites sont ouverts. Les contraintes (5.4) assurent que chaque client est livré depuis un seul site. Chaque client est livré depuis un site ouvert selon les contraintes (5.5). Enfin, les variables sont binaires selon les contraintes (5.6). La fonction objectif est la somme des coûts et s'écrit sous la forme suivante :

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i \in I} o_i \cdot u_i \quad (5.7)$$

1.2 Uncapacitated Plant Location Problem, noté *UPLP* - Erlenkotter (1978)

L'*UPLP* est un problème proche du problème précédent. La différence réside dans le nombre de sites à ouvrir qui n'est pas fixé, ainsi la contrainte (5.3) n'a plus lieu d'être. Les contraintes (5.4) à (5.6) et la fonction objectif (5.7) sont conservées.

1.3 Capacitated Plant Location Problem, noté *CPLP* - Sá (1969)

Le *CPLP* est une extension du modèle précédent, il intègre des contraintes de capacité sur les sites. La capacité du site $i \in I$ est notée c_i . À partir du moment où nous parlons de capacité, il faut définir la demande de chaque client, elle est notée d_j , $j \in J$. La contrainte (5.4) est remplacée par la contrainte de capacité (5.8). Les contraintes (5.5) et (5.6) ainsi que la fonction objectif (5.7) sont conservées.

$$\sum_{j \in J} d_j \cdot x_{ij} \leq c_i \cdot y_i \quad \forall i \in I \quad (5.8)$$

Ces modèles ne permettent pas de s'adapter ou d'anticiper l'évolution économique sur le long terme. C'est pour cela que sont rapidement apparus les modèles multi-période qui autorisent d'ouvrir ou de fermer des installations à chaque période. Comme nous l'avons vu en introduction de ce mémoire, la population vieillit et certaines zones rurales ou montagneuses en Auvergne ne sont pas suffisamment couverte par des structures de type SSIAD. Les modèles multi-période permettent de prévoir à quel horizon et dans quelle zone ouvrir de nouvelles structures pour compléter la couverture actuelle suivant l'évolution de la population. Dans le cadre de structures de maintien à domicile, les modèles multi-période sont intéressants pour identifier à quel horizon et à quel endroit ouvrir de nouvelles structures pour augmenter la zone de couverture et d'accès aux soins.

2 Modèle mono-échelon multi-période

Nous débutons par un modèle déterministe mono-produit nommé *Simple Dynamic Location Problem (SDLP)* proposé par Saldanha-Da-Gama et Captivo (1998). Le réseau est composé de plates-formes de stockage. L'objectif est de localiser les sites où ouvrir une installation (plate-forme) en minimisant la somme des coûts fixes d'ouverture des installations, d'exploitation des installations et de distribution aux clients. Les auteurs font l'hypothèse que :

- un client est livré par une installation,

- les installations sont à capacité infinie,
- l'ouverture d'une installation (resp. fermeture) est immédiate et a lieu en début (resp. fin) de période,
- une installation peut changer d'état au plus une fois sur l'horizon,
- aucune installation ne peut être fermée pendant la dernière période.

Les données du modèle sont :

- TP horizon de temps divisé en T périodes,
- I ensemble des clients,
- J ensemble des sites potentiels,
- c_{ij}^t coût pour satisfaire la demande du client i à la période t par une installation située sur le site j ,
- o_j^t coût fixe d'exploitation d'une installation sur le site j à la période t .

Le sous-ensemble J_o (resp. J_f) est l'ensemble des sites où une installation peut être ouverte (resp. fermée). Les variables de décisions sont :

- $x_{ij}^t = 1$ si la demande du client i est satisfaite par l'installation située sur le site j pendant la période t , 0 sinon
- $u_j^t = 1$ si une installation située sur le site j est ouverte à la période t , 0 sinon

Les auteurs proposent le modèle linéaire suivant :

$$\min \sum_{t \in TP} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}^t \cdot x_{ij}^t + \sum_{t \in TP} \sum_{j \in J} o_j^t \cdot u_j^t \quad (5.9)$$

sous les contraintes :

$$\sum_{j \in J} x_{ij}^t = 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in TP \quad (5.10)$$

$$x_{ij}^t - u_j^t \leq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in TP \quad (5.11)$$

$$u_j^{t+1} - u_j^t \leq 0 \quad \forall j \in J_f, \forall t \in \{1, \dots, T-1\} \quad (5.12)$$

$$u_j^{t+1} - u_j^t \geq 0 \quad \forall j \in J_o, \forall t \in \{1, \dots, T-1\} \quad (5.13)$$

$$x_{ij}^t \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in TP \quad (5.14)$$

$$u_j^t \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, \forall t \in TP \quad (5.15)$$

L'objectif (5.9) est de minimiser la somme des coûts (premier terme) et des coûts d'exploitation des installations ouvertes (deuxième terme). La contrainte (5.10) assure que la demande est servie à chaque période. La contrainte (5.11) vérifie qu'aucun client n'est relié à une installation fermée. Les contraintes (5.12) et (5.13) garantissent que les installations changent d'état une seule fois au maximum sur l'horizon concerné. Les variables sont binaires selon (5.14) et (5.15). Dans un deuxième temps, les auteurs complètent le modèle en intégrant des coûts d'ouverture et de fermeture. Pour résoudre ce problème, les auteurs proposent une heuristique en deux étapes. La première est une heuristique de construction itérative, nommée DROP décrite par Domschke et Drexl (1985), la seconde une heuristique d'amélioration (recherche locale). Les instances sont générées aléatoirement. $|I|$ varie entre 10 et 500, $|J|$ prend les valeurs 5, 10 et 20. Les auteurs comparent les résultats avec ceux obtenus par la procédure présentée par Van-Roy et Erlenkotter (1982) basée sur le problème dual. Les écarts relatifs moyens entre les deux méthodes sont compris entre 0,13 et 6,77. De plus, les temps de résolution sont plus faibles en utilisant l'heuristique de Saldanha-Da-Gama et Captivo (1998).

(Melo et al. 2006) proposent un modèle qui intègre la capacité des installations comme variable de décision. Les installations sont donc à capacité finie évolutive. De plus, ils complètent les coûts en intégrant les coûts de distribution/transport, exploitation des installations et stockage. Dans la seconde partie du papier, ils généralisent le modèle en intégrant deux échelons supplémentaires.

(Dias et al. 2006) décrivent trois modèles déterministes mono-échelon, mono-produit avec ouverture, fermeture et réouverture d'installations. À l'inverse des modèles précédents, les auteurs considèrent qu'un client peut être approvisionné par plusieurs installations et qu'une installation fermée peut être réouverte avant la fin de l'horizon.

(Ghaderi et Jabalameli 2013) proposent un modèle multi-période mono-échelon de conception de réseaux logistiques en intégrant une contrainte de budget afin d'obtenir un planning de développement de service de soins pour faciliter l'accès aux soins dans des pays en voie de développement. À chaque période, l'entreprise a un budget maximum pour ouvrir de nouvelles installations sur des sites potentiels et de nouvelles routes de distribution. Les coûts considérés sont donc les coûts d'ouverture d'installation et de routes, les coûts d'exploitation des installations ouvertes et les coûts de transport. Le modèle proposé par les auteurs est non-linéaire en raison des contraintes liées au budget. En effet, le budget non utilisé lors d'une période peut être reporté sur la période suivante. Les auteurs proposent deux méthodes pour déterminer le réseau logistique ainsi que les routes à utiliser. La première consiste à fixer certaines variables et à résoudre le modèle à l'aide d'un solveur, la seconde est un algorithme hybride itératif basé sur le recuit simulé et la linéarisation du modèle.

Nous avons décrit dans cette partie les modèles multi-période mono-échelon de conception de réseaux logistiques. Les données, contraintes et objectifs des modèles de base ont été détaillés. Ensuite, différentes variantes ont été décrites en focalisant sur les caractéristiques du réseau, les règles de gestion et les coûts. Cependant, les réseaux logistiques sont de plus en plus complexes, la localisation de plates-formes de stockage ne dépend plus seulement des clients mais également des sites de production, des fournisseurs, ... Le réseau logistique doit être considéré dans son ensemble. Les modèles de conception évoluent donc en intégrant la localisation de plusieurs niveaux du réseau. Les modèles multi-échelon permettent de répondre à cette évolution et aux besoins de localisation de structures de maintien à domicile.

3 Ébauche de démarche de résolution

La localisation des structures de maintien à domicile ne peut pas se faire sans connaître la localisation des patients mais également sans dimensionner les ressources nécessaires dans chaque site et évaluer l'impact de cette organisation globale sur le fonctionnement opérationnel de la structure, c'est-à-dire la construction des tournées de soins entre autres. Nous avons donc découpé le problème en trois sous-problèmes, chacun des sous-problèmes correspondant à un niveau de décision. La méthode de résolution pourrait fonctionner de la manière suivante (cf. figure 5.5).

- niveau stratégique : problème de localisation des structures de maintien à domicile. Parmi un ensemble de sites disponibles et en évaluant les besoins sur des bassins de population, en fonction de sources démographiques (au niveau d'une commune ou d'un canton), identifier les sites à ouvrir en minimisant les coûts d'ouverture et d'exploitation des structures.
- niveau tactique : problème d'affectation et de dimensionnement. Cette seconde phase affecte les patients aux sites ouverts (suivant la distance par exemple) puis dimensionne les ressources nécessaires.
- niveau opérationnel : problème de tournées de véhicules. Cette dernière phase consiste à construire les tournées au départ de chacun des sites ouverts à l'aide de l'outil proposé dans le chapitre 4

L'intérêt est que cette méthode nous permettrait de réutiliser les méthodes développées dans le chapitre 4 pour la dernière étape. En effet, dans cette dernière étape, il est nécessaire de valider la faisabilité de la solution proposée et évaluer des critères de performance opérationnels comme les taux d'occupation des ressources, la part du temps de soins par rapport au temps total de travail, la

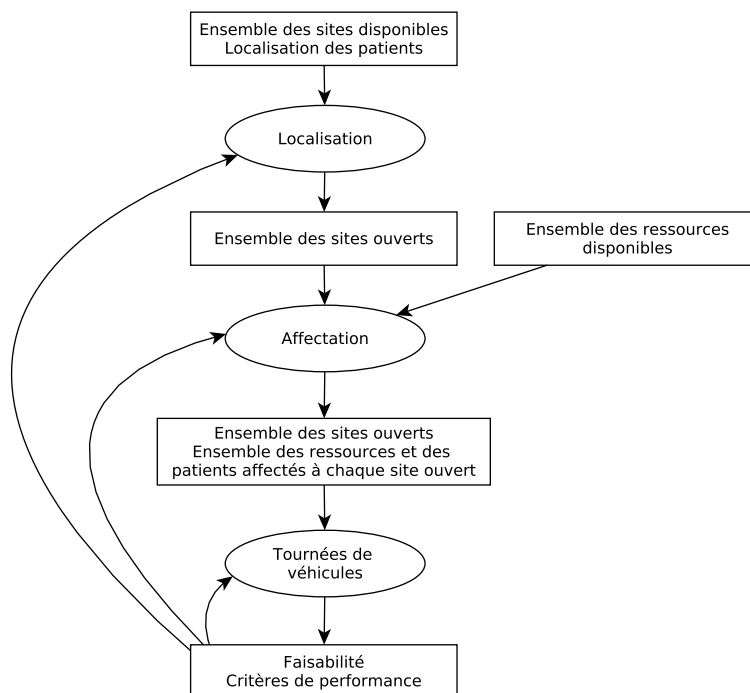


Figure 5.5 – Approche de résolution

distance ou durée totale de transport, ... Tant que la solution n'est pas réalisable ou que les critères de performance n'ont pas des valeurs satisfaisantes, le processus est réitéré.

Ces travaux sont poursuivis dans le cadre d'un partenariat avec l'ARS.

Conclusion

Dans le chapitre 4, nous avons proposé un outil pour l'organisation de tournées de soins à domicile. Cependant, toutes les fonctionnalités d'un outil d'aide à la décision ne sont pas couvertes. Nous avons donc travaillé sur la réorganisation de tournée. Nous avons traité le cas de l'absence d'une ressource en intégrant les activités non réalisées dans les tournées des ressources disponibles. Les solutions de la réorganisation sont comparées, pour une instance, aux solutions obtenues en organisant les tournées avec une ressource en moins. Les premiers résultats montrent que cette approche permet d'obtenir des solutions intéressantes avec des retards nuls sur certaines instances. Il faut noter que l'augmentation de la part d'activités synchronisées complique cependant la résolution.

Dans la deuxième partie, nous avons fait le choix d'inclure des temps de transport stochastiques. Nous avons étudié l'impact des temps de transport aléatoires sur la solution construite en contexte déterministe. L'impact est évalué en fonction du retard constaté par rapport aux dates de début au plus tard des activités. Ensuite, nous avons construit une solution, avec la recherche locale itérée, en intégrant dans les critères de performance la robustesse des solutions.

La troisième partie fait suite à une collaboration entre l'ARS d'Auvergne et le LIMOS pour étudier le parcours de la personne âgée en Auvergne. Les SSIAD sont des vecteurs de maintien à domicile pour les personnes âgées et, en Auvergne, les zones rurales et montagneuses ne proposent pas ces services. Peu de travaux traitent des problèmes de localisation dans le cadre de structures de maintien à domicile. Nous avons donc étudié, et présenté ici, les problèmes de la littérature de conception de réseaux logistiques dans un cadre industriel et proposé une démarche de résolution.

Conclusion

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés aux structures de maintien à domicile et plus particulièrement les services d'Hospitalisation À Domicile et les Services de Soins Infirmiers À Domicile. Nous avons travaillé sur une partie du pilotage opérationnel de ces structures qui est l'organisation des tournées de soins aux domiciles des patients. Ce problème est un problème de tournées de véhicules qui intègre des contraintes spécifiques comme la synchronisation d'activités et les types de ressources. Ce mémoire est articulé autour de cinq chapitres.

Dans le chapitre 1, nous avons défini le contexte et la problématique de nos travaux. Pour cela, nous avons débuté par quelques définitions, plus ou moins récentes, trouvées dans la littérature et les facteurs démographiques, politiques et économiques de développement de ces structures. Nous présentons ensuite des structures existantes en France, comme les services de HAD ou les SSIAD, et des structures locales de Montluçon et Clermont-Ferrand. Ce chapitre se termine par les problématiques en lien avec la recherche opérationnelle qui peuvent être rencontrées dans les structures de maintien à domicile et plus particulièrement la problématique qui amène ce mémoire.

Le chapitre 2 est une revue de la littérature portant sur l'organisation de tournées de soins à domicile. Pour le structurer, nous avons proposé une classification suivant les deux spécificités du problème que nous souhaitons traiter : la prise en compte de un ou plusieurs types de ressources et la prise en compte ou non des contraintes de synchronisation. Une notation, réalisée par analogie avec la notation $(\alpha|\beta, \gamma)$ de Graham et al. (1979), est également proposée. Le champ α décrit les caractéristiques des patients et des ressources, le champ β les règles de gestion, c'est-à-dire les règles qui font interagir les patients et les ressources. Le dernier champ γ concerne les critères de performances. Ensuite, nous avons présenté des travaux de la littérature en suivant la structure de la classification proposée et terminé par un résumé des méthodes de résolution utilisées.

Le chapitre 3 débute par une description de la méthode de modélisation que nous avons suivie. Elle est composée de quatre étapes. La première étape consiste à construire le modèle de connaissance qui fait l'objet de ce chapitre. Ce modèle est réalisé après une phase d'analyse et de spécification du problème traité. Ce travail est présenté sous la forme d'un diagramme de classes UML pour la modélisation des données de base et d'un autre diagramme de classes intégrant l'organisation des tournées. Ce chapitre aboutit sur une analyse des besoins classés en trois catégories (organisation, simulation et consultation) pour la réalisation d'un outil d'aide à la décision pour la construction des tournées de soins à domicile et la proposition de deux modèles mathématiques du problème traité. Cette modélisation intègre le degré de compatibilité qui permet de modéliser deux aspects importants de notre problème que sont les types de ressource et la préférence des patients.

La chapitre 4 fait l'objet des étapes 2 et 3 de la méthodologie suivie. Il débute par une présentation succincte des méthodes approchées que nous avons utilisées ainsi que des hybridations de méthodes. Ces méthodes de type métaheuristique reposent sur l'exploration de l'espace des solutions en intensifiant la recherche dans des zones prometteuses. Pour les mettre en œuvre, nous avons utilisé un codage de solution indirect, classique dans la littérature selon (Taillard 2002), et proposé un codage de solution direct spécifique à notre problème. À ces deux codages de solutions sont associés des systèmes de voisinage. Le codage indirect nécessite l'utilisation d'un modèle de simulation avec une règle de gestion pour affecter les ressources aux activités. Le codage direct est basé sur l'utilisation d'un autre modèle de

simulation qui vérifie la faisabilité d'une solution donnée. Ces deux outils sont utilisés également pour calculer les dates de début des activités et évaluer les critères de performance choisis tout au long de ce mémoire. Cela nous mène naturellement à la présentation des deux couplages que nous avons proposés pour résoudre le problème. Ce chapitre se termine par la présentation des résultats obtenus. Dans un premier temps, nous avons adapté nos méthodes pour résoudre les instances de la littérature d'un problème proche du nôtre. Cela nous a permis de conserver les méthodes les plus efficaces, comparer nos résultats avec les résultats de la littérature et trouver de nouvelles bornes supérieures sur plusieurs instances de différentes tailles. Dans un second temps, nous avons adapté ces mêmes instances à notre problème et comparé les résultats obtenus avec les résultats du solveur Cplex, sur les petites instances, en utilisant notre formalisation mathématique présentée dans le chapitre 3.

Bien que nous n'ayons pas détaillé l'outil d'aide à la décision que nous avons conçu, nous souhaitons donner un aperçu dans cette conclusion de l'ensemble des fonctionnalités actuellement développées. Nous reprenons chaque fonctionnalité décrite dans le chapitre 3 figure 3.4 en indiquant comment utiliser l'outil.

Visualiser une tournée : *les soignants consultent les informations sur les patients présents qui composent leurs tournées, l'adresse, le niveau de dépendance, ... La visualisation des tournées est primordiale pour qu'une ressource anticipe sa période de travail (heure de début théorique d'une activité chez un patient, soins à réaliser, autre ressource présente dans le cas d'activité synchronisée par exemple).*

Nous ne nous sommes pas concentrés sur cet aspect de notre outil, cette fonctionnalité n'est donc actuellement pas supportée. Cependant, pour pouvoir être utilisé dans des structures de maintien à domicile, des interfaces homme-machine doivent être développées.

Construire les tournées de soins : *aucune tournée n'est encore construite, un ensemble de patients doit être soigné, un ensemble de ressources est disponible. Il faut donc affecter les ressources aux activités puis construire les tournées.*

C'est le cœur de notre travail, cette fonctionnalité est remplie par les méthodes du chapitre 4.

Construire les tournées avec affectation préalable : *les patients sont affectés, au préalable, par le coordinateur aux ressources mais l'ordre de réalisation des activités n'est pas défini. Il faut alors construire la tournée de chaque ressource.*

Cette fonctionnalité peut également être réalisée par les méthodes du chapitre 4. Pour cela, il faut construire une solution initiale, non plus aléatoirement, mais en affectant les activités aux ressources souhaitées, mais dans un ordre aléatoire, et utiliser ensuite uniquement les systèmes de voisinage insertion I_2 et permutation P_2 intra-tournée. Ainsi les activités resteront affectées à la ressource prévue.

Admettre un patient : *un ou plusieurs nouveaux patients sont admis dans la structure et les tournées existantes sont conservées. Ces patients doivent être affectés aux ressources et insérer dans leur tournée.*

Cette fonctionnalité peut être réalisée avec la méthode de réorganisation des tournées proposées dans le chapitre 5. Les activités qui concernent les nouveaux patients sont incluses dans l'ensemble A_{r_0} (ensemble des activités à insérer dans les tournées des ressources disponibles) et aucune ressource est déclarée absente. Cela nécessite bien sûr de compléter les données (distancier, niveau de dépendance, nombre et type de ressources requis, ...).

Réorganiser les tournées : *une ressource ne peut pas, pour diverses raisons, réaliser les activités qui lui sont affectées, les activités sont dispatchées dans les tournées des autres ressources présentes en perturbant le moins possible leur tournée.*

Cette fonctionnalité fait l'objet de la première partie du chapitre 5.

Évaluer une solution partielle : *à partir de la liste ordonnée des activités d'une ressource, l'outil permet d'évaluer les critères de performance de la tournée considérée.*

Le modèle de simulation permet d'évaluer une ou plusieurs tournées.

Évaluer une solution complète : *à partir de la liste ordonnée des activités de chaque ressource, l'outil permet de vérifier le respect des contraintes, calculer l'heure de début des activités et évaluer*

les critères de performance.

Cette fonctionnalité est réalisée par le modèle de simulation proposé dans le chapitre 4.

Le chapitre 5 est un chapitre d'ouverture et de perspectives. Tout d'abord, nous avons travaillé sur la réorganisation des tournées en cas d'absence d'une ressource, fonctionnalité importante ressortie lors de l'analyse des besoins. La méthode de résolution proposée permet de conserver les tournées initialement construites en réinsérant les activités de la ressource absente dans les tournées des ressources disponibles. Comme dans le chapitre précédent, nous avons proposé une représentation d'une solution et les systèmes de voisinage associés. L'évaluation d'une solution est faite avec le modèle de simulation présenté dans le chapitre 4. Pour terminer, des premiers tests sont présentés.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la robustesse des solutions construites en contexte déterministe. Nous avons fait le choix d'intégrer des temps de transport stochastiques. La robustesse est évaluée suivant le non respect des dates de début au plus tard des activités. Nous avons ensuite comparé la robustesse des solutions trouvées dans le chapitre 4 avec des solutions trouvées avec une approche que nous proposons. Cette approche intègre la robustesse comme critère de performance dans l'optimisation. Des travaux complémentaires seraient intéressants en définissant une distribution de vitesse suivant les heures de la journée ou intégrant l'aléa sur la durée des activités. Pour ces deux parties, les résultats sont succincts et les méthodes proposées mériteraient d'être approfondies avec des expérimentations plus poussées.

La dernière partie de ce chapitre fait l'objet d'une revue, non exhaustive, de la littérature sur les problèmes de localisation ou *logistic network design*. Ce travail a été envisagé dans le cadre de travaux sur le parcours des personnes âgées en Auvergne qui s'intéressent à la localisation de structures de maintien à domicile, comme les SSIAD, pour faciliter l'accès aux soins dans des zones rurales. Cette partie se termine par une ébauche de démarche de résolution basée sur le découpage en trois sous-problèmes de niveau stratégique, tactique et opérationnel.

En dehors des pistes de recherche évoquées dans le chapitre 5, nous envisageons également l'utilisation de métaheuristiques à population qui permettraient un travail sur l'aspect multi-objectif. Pour terminer, il serait intéressant de tester nos méthodes sur d'autres instances de la littérature et des instances réelles.

Références bibliographiques

- Affi, S., Dang, D.-C. et Moukrim, A. (2013). A simulated annealing algorithm for the vehicle routing problem with time windows and synchronization constraints, *Learning and Intelligent Optimization*, Springer, pp. 259 – 265.
- Affi, S., Dang, D.-C. et Moukrim, A. (2015). Une heuristique pour un probleme de tournées de véhicules avec fenêtres de temps et des visites synchronisées, *ROADEF 2015, 16ème congrès annuel de la Société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision*.
- Akjiratikarl, C., Yenradee, P. et Drake, P. R. (2007). Pso-based algorithm for home care worker scheduling in the uk, *Computers & Industrial Engineering* **53**(4) : 559 – 583.
- Aleksy, B., Chabrol, M., Chauvet, J. et Fenies, P. (2006). Le projet de modélisation et de simulation des flux du nouvel hôpital Estaing : Aide à la décision versus management du changement, MOSIM.
- Aligon, A., Com-Ruelle, L., Renaud, T. et Lebrun, E. (2003). Le coût de prise en charge en hospitalisation à domicile (HAD), *Questions d'économie de la santé* (67) : 1 – 6.
- Allaoua, H., Borne, S., Létocart, L. et Wolfler Calvo, R. (2013). A matheuristic approach for solving a home health care problem, *Electronic Notes in Discrete Mathematics* **41** : 471 – 478.
- Ambrosino, D. et Scutellà, M. G. (2005). Distribution network design : New problems and related models, *European Journal of Operational Research* **165**(3) : 610 – 624.
- Bashir, B. (2013). *Contribution to modeling and optimization of home healthcare*, PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand.
- Begur, S. V., Miller, D. M. et Weaver, J. R. (1997). An integrated spatial dss for scheduling and routing home-health-care nurses, *Interfaces* **27**(4) : 35 – 48.
- Ben Bachouch, R. (2011). *Pilotage opérationnel des structures d'hospitalisation à domicile*, PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Ben Bachouch, R., Fakhfakh, M., Guinet, A. et Hajri-Gabouj, S. (2008). Planification des tournées des infirmiers dans une structure de soins à domicile, *Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH)*, Switzerland.
- Bertels, S. et Fahle, T. (2006). A hybrid setup for a hybrid scenario : combining heuristics for the home health care problem, *Computers & Operations Research* **33**(10) : 2866 – 2890.
- Blum, C. et Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization : Overview and conceptual comparison, *ACM Computing Surveys (CSUR)* **35**(3) : 268 – 308.
- Borsani, V., Matta, A., Beschi, G. et Sommaruga, F. (2006). A home care scheduling model for human resources, *Service Systems and Service Management, 2006 International Conference on*, Vol. 1, IEEE, pp. 449 – 454.
- Boutevin, C. (2003). *Problèmes d'ordonnancement et d'affectation avec contraintes de ressources de type RCPSP et line balancing*, PhD thesis, Clermont-Ferrand 2.
- Bredström, D. et Rönnqvist, M. (2008). Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints, *European Journal of Operational Research* **191**(1) : 19 – 31.

- Cattafi, M., Herrero, R., Gavanelli, M., Nonato, M., Malucelli, F. et Ramos, J. J. (2012). Improving quality and efficiency in home health care : an application of constraint logic programming for the ferrara nhs unit., *ICLP (Technical Communications)*, pp. 415 – 424.
- Chabrol, M., Chauvet, J., Fénies, P. et Gourgand, M. (2006). A methodology for process evaluation and activity based costing in health care supply chain, *Business Process Management Workshops*, Springer, pp. 375 – 384.
- Cheng, E. et Rich, J. L. (1998). A home health care routing and scheduling problem, *Rice University, Texas, Tech. Rep. TR98-04* .
- Chevreul, K., Bahrami, S., Lucier, S. et Lelouarne, J. (2009). Les patients en service de soins infirmiers à domicile (ssiad), le coût de leur prise en charge et ses déterminants, *Ministère du Travail, des Relations sociales, de la Famille, de la Solidarité et de la Ville, Paris 2009* .
- Clarke, G. et Wright, J. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, *Operations research* **12**(4) : 568 – 581.
- Cordeau, J.-F. et Laporte, G. (2003). The dial-a-ride problem (darp) : Variants, modeling issues and algorithms, *Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies* **1**(2) : 89 – 101.
- De Angelis, V. (1998). Planning home assistance for aids patients in the city of rome, italy, *Interfaces* **28**(3) : 75 – 83.
- Deroussi, L. (2002). *Heuristiques, métaheuristiques et systèmes de voisinage : application à des problèmes théoriques et industriels de type TSP et ordonnancement*, PhD thesis, Clermont-Ferrand 2.
- Dias, J., Captivo, M. E. et ClÁmaco, J. (2006). Capacitated dynamic location problems with opening, closure and reopening of facilities, *IMA Journal of Management Mathematics* **17**(4) : 317 – 348.
- Dohn, A., Rasmussen, M. S. et Larsen, J. (2011). The vehicle routing problem with time windows and temporal dependencies, *Networks* **58**(4) : 273 – 289.
- Domschke, W. et Drexl, A. (1985). Add-heuristics' starting procedures for capacitated plant location models, *European Journal of Operational Research* **21**(1) : 47 – 53.
- Drexl, M. (2012). Synchronization in vehicle routing-a survey of vrps with multiple synchronization constraints, *Transportation Science* **46**(3) : 297 – 316.
- Ennuyer, B. (2007). 1962-2007 : Regards sur les politiques du «maintien à domicile», *Gérontologie et société* (4) : 153 – 167.
- Erlenkotter, D. (1978). A dual-based procedure for uncapacitated facility location, *Operations Research* **26**(6) : 992 –1009.
- Eveborn, P., Flisberg, P. et Rönnqvist, M. (2006). Laps care - an operational system for staff planning of home care, *European Journal of Operational Research* **171**(3) : 962 – 976.
- Fikar, C. et Hirsch, P. (2014). A matheuristic for routing real-world home service transport systems facilitating walking, *Journal of Cleaner Production In Press* .
- Fischetti, M., Polo, C. et Scantamburlo, M. (2003). A local branching heuristic for mixed-integer programs with 2-level variables, with an application to a telecommunication network design problem, *Networks* **44**(2) : 61 – 72.
- Fleury, G. (1993). *Méthodes stochastiques et déterministes pour les problèmes NP-difficiles*, PhD thesis, Clermont-Ferrand 2.
- Franceschelli, M., Rosa, D., Seatzu, C. et Bullo, F. (2013). Gossip algorithms for heterogeneous multi-vehicle routing problems, *Nonlinear Analysis : Hybrid Systems* **10** : 156 – 174.
- Gayraud, F., Deroussi, L., Grangeon, N. et Norre, S. (2014a). Combination between metaheuristics and simulation model for a routing problem, *Proceedings of the 14th International Conference on Project Management Scheduling*, TUM School of management.

- Gayraud, F., Deroussi, L., Grangeon, N. et Norre, S. (2014b). Problème de tournées de véhicule avec synchronisation pour l'organisation de soins à domicile, *10th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation*.
- Gayraud, F., Grangeon, N., Deroussi, L. et Norre, S. (2015). Notation and classification for logistics network design models, *RAIRO-Operations Research* **49**(1) : 195 – 214.
- Ghaderi, A. et Jabalameli, M. S. (2013). Modeling the budget-constrained dynamic uncapacitated facility location network design problem and solving it via two efficient heuristics : A case study of health care, *Mathematical and Computer Modelling* **57**(3?4) : 382 – 400.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, *Computers & operations research* **13**(5) : 533 – 549.
- Glover, F. (1989). Tabu search-part i, *ORSA Journal on computing* **1**(3) : 190 – 206.
- Gourc, D., Marmier, F., Chardon, M. et Steffan, L. (2013). Vers un algorithme de planification des actes d'une structure de soins infirmiers, *Proceedings of the Workshop Optimisation des systèmes, Amélioration continue et transformation des entreprises*, Marrakech, Maroc.
- Gourgand, M. et Kellert, P. (1991). Conception d'un environnement de modélisation de systèmes de production, *Actes du 3^{ème} congrès international de Génie industriel*, Tours.
- Graham, R. L., Lawler, E. L., Lenstra, J. K. et Kan, A. (1979). Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling : a survey, *Annals of discrete Mathematics* **5** : 287 – 326.
- Grangeon, N. (2001). *Métaheuristiques et modèles d'évaluation pour le problème du flow-shop hybride hiérarchisée*, PhD thesis, Clermont-Ferrand 2.
- Henrard, J.-C. (2005). Répartition des ressources et démarche stratégique de santé publique, *Dossier «Politiques et programmes nationaux de santé». Actualité et Dossier en Santé Publique* **50** : 18 – 21.
- Kennedy, J. et Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization, *Proceedings of IEEE international conference on neural networks*, Vol. 4, Perth, Australie, pp. 1942 – 1948.
- Kergosien, Y., Lenté, C. et Billaut, J.-C. (2009). Home health care problem : An extended multiple traveling salesman problem, *4th Multidisciplinary International Conference on Scheduling : Theory and Applications (MISTA'09)*, Dublin (Irlande), pp. 85 – 92.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. et Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing, *Science* **220**(4598) : 671 – 680.
- Kirkpatrick, S., Gellatt, C. et Vecchi, M. (1982). Optimization by simulated annealing, *ibm thomas j, Watson research Center, Yorktown Heights, NY*.
- Kuehn, A. et Hamburger, M. (1963). A heuristic program for locating warehouses, *Management science* **9**(4) : 643 – 666.
- Labadie, N., Prins, C. et Yang, Y. (2014). Iterated local search for a vehicle routing problem with synchronization constraints, *ICORES 2014-Proceedings of the 3rd International Conference on Operations Research and Enterprise Systems, Angers, Loire Valley, France*, pp. 257 – 263.
- Laroque, P. (1962). *Politique de la vieillesse*, Haut Comité Consultatif de la Population et de la Famille.
- Lecluyse, C., Van Woensel, T. et Peremans, H. (2009). Vehicle routing with stochastic time-dependent travel times, *4OR* **7**(4) : 363 – 377.
- Lernout, T., Lebrun, L. et Bréchat, P.-H. (2008). Trois générations de schémas régionaux d'organisation sanitaire en quinze années : bilan et perspectives, *Santé publique* **19**(6) : 499 – 512.
- Liu, R., Jiang, Z., Fung, R. Y., Chen, F. et Liu, X. (2010). Two-phase heuristic algorithms for full truckloads multi-depot capacitated vehicle routing problem in carrier collaboration, *Computers & Operations Research* **37**(5) : 950–959.
- Liu, R., Xie, X., Augusto, V. et Rodriguez, C. (2013). Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care, *European Journal of Operational Research* **230**(3) : 475 – 486.

- Lourenço, H. R., Martin, O. C. et Stützle, T. (2003). *Iterated local search*, Springer.
- Martel, A. (2005). The design of production-distribution networks : A mathematical programming approach, pp. 265 – 305.
- Melo, M., Nickel, S. et Saldanha-Da-Gama, F. (2006). Dynamic multi-commodity capacitated facility location : a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning, *Computers & Operations Research* **33**(1) : 181 – 208.
- Melo, M., Nickel, S. et Saldanha-Da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management : A review, *European Journal of Operational Research* **196**(2) : 401 – 412.
- Mladenović, N. et Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search, *Computers & Operations Research* **24**(11) : 1097 – 1100.
- Morito, S., Kishimoto, D., Hayashi, H., Torigoe, A., Okamoto, S., Matsukawa, Y. et Taniguchi, N. (2014). A column generation approach to home care staff routing and scheduling, *Operations Research Proceedings 2013*, Springer, pp. 317 – 323.
- Norre, S. (2005). Heuristiques et métaheuristiques pour la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire dans les systèmes de production, *Habilitation à diriger des recherches, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II*.
- Organisation Mondiale de la Santé, Z. E. (2012). Vieillir en bonne santé : politiques et interventions prioritaires, http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/161932/policy-brief-on-healthy-ageing-FRE.pdf?ua=1.
- Osman, I. H. et Laporte, G. (1996). Metaheuristics : A bibliography, *Annals of Operations research* **63**(5) : 511–623.
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C. et Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems, *European Journal of Operational Research* **225**(1) : 1 – 11.
- Rais, A. et Viana, A. (2011). Operations research in healthcare : a survey, *International Transactions in Operational Research* **18**(1) : 1 – 31.
- Rasmussen, M. S., Justesen, T., Dohn, A. et Larsen, J. (2012). The home care crew scheduling problem : Preference-based visit clustering and temporal dependencies, *European Journal of Operational Research* **219**(3) : 598 – 610.
- Redjem, R., Kharraja, S., Xie, X. et Marcon, E. (2012). Routing and scheduling of caregivers in home health care with synchronized visits, *Proceedings of MOSIM'12*.
- Riazi, S., Chehraz, P., Wigström, O., Bengtsson, K. et Lennartson, B. (2014). A gossip algorithm for home healthcare scheduling and routing problems, *Preprints of the 19th World congress, Afrique du Sud*, Vol. 19, pp. 10754 – 10759.
- Roy, B. (2005). Flexibilité et robustesse en ordonnancement, chapitre : À propos de robustesse en recherche opérationnelle et aide à la décision, *Hermès, Paris*.
- Roy, J. (1994). L'histoire du maintien à domicile ou les nouveaux apôtres de l'état, *Service social* **43** : 7 – 32.
- Sá, G. (1969). Branch-and-bound and approximate solutions to the capacitated plant-location problem, *Operations Research* **17**(6) : 1005–1016.
- Saldanha-Da-Gama, F. et Captivo, M. E. (1998). A heuristic approach for the discrete dynamic location problem, *Location Science* **6** : 211 – 223.
- Solomon, M. M. et Desrosiers, J. (1988). Survey paper-time window constrained routing and scheduling problems, *Transportation science* **22**(1) : 1 – 13.
- Taillard, E. (2002). Principes d'implémentation des métaheuristiques, *Optimisation approchée en recherche opérationnelle* pp. 57 – 79.
- Talbi, E.-G. (2002). A taxonomy of hybrid metaheuristics, *Journal of heuristics* **8**(5) : 541 – 564.

- Thomsen, K. (2006). *Optimization on home care*, PhD thesis, Technical University of Denmark, DTU, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark.
- Trautsamwieser, A. et Hirsch, P. (2011). Optimization of daily scheduling for home health care services, *Journal of Applied Operational Research* **3**(3) : 124 – 136.
- Trautsamwieser, A. et Hirsch, P. (2014). A branch-price-and-cut approach for solving the medium-term home health care planning problem, *Networks* **64**(3) : 143–159.
- Van-Roy, T. et Erlenkotter, D. (1982). A dual-based procedure for dynamic facility location, *Management Science* **28**(10) : 1091 – 1105.

Annexes

Annexe 1 - Résultats - instances de Bredström et Rönnqvist (2008)

Cette annexe contient les résultats sur les instances de Bredström et Rönnqvist (2008) obtenus avec le recuit simulé et la recherche locale itérée. Le tableau 6.1 structure cette annexe en donnant la référence du tableau suivant la méthode, les tailles d'instances et le critère de performance.

Instance	Critère	Recuit simulé	Recherche locale itérée		
			<i>RW</i>	<i>BW</i>	<i>RW</i>
Petite	durée des tournées	tab. 6.2	tab. 6.5	tab. 6.6	tab. 6.7
	préférence patients	tab. 6.3	tab. 6.8	tab. 6.9	tab. 6.10
	équilibre des tournées	tab. 6.4	tab. 6.11	tab. 6.12	tab. 6.13
	durée et équilibre	-	-	tab. 6.14	
Moyenne	durée et équilibre	-	-	tab. 6.15	tab. 6.16
Grande	durée et équilibre	-	-		

Tableau 6.1 – Tableau des tableaux de résultats - instances de Bredström et Rönnqvist (2008)

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1 <i>F</i>	5.13	5.13	5.96	-	-	-	-	5.96	5.96	5.96	0.0
1 <i>S</i>	3.55	3.55	5.68	5.0	5.41	-	5.45	5.0	5.385	5.68	0.245
1 <i>M</i>	3.55	3.55	4.67	4.81	5.06	4.48	5.06	4.48	4.816	5.06	0.225
1 <i>L</i>	3.44	3.44	5.09	3.42	4.55	4.49	4.62	3.42	4.434	5.09	0.549
1 <i>A</i>	3.16	3.16	3.2	3.14	3.5	3.22	3.19	3.14	3.25	3.5	0.128
2 <i>F</i>	4.98	4.98	5.46	6.61	6.02	5.91	6.61	5.46	6.122	6.61	0.44
2 <i>S</i>	4.27	4.27	5.75	5.62	6.9	4.98	5.2	4.98	5.69	6.9	0.666
2 <i>M</i>	3.58	3.58	4.27	3.99	4.23	5.04	4.72	3.99	4.45	5.04	0.378
2 <i>L</i>	3.58	3.42	3.74	4.34	4.36	3.55	4.91	3.55	4.18	4.91	0.486
2 <i>A</i>	3.58	3.34	3.13	2.97	3.58	3.35	3.3	2.97	3.27	3.58	0.206
3 <i>F</i>	5.19	5.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 <i>S</i>	3.63	3.63	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	5.85	0.0
3 <i>M</i>	3.41	3.33	5.29	3.94	3.94	3.82	5.78	3.82	4.554	5.78	0.817
3 <i>L</i>	3.29	3.29	4.29	3.88	4.19	3.97	3.73	3.73	4.012	4.29	0.204
3 <i>A</i>	3.1	3.28	2.97	3.03	3.09	2.99	3.12	2.97	3.04	3.12	0.057
4 <i>F</i>	7.21	7.21	-	8.32	-	8.32	-	8.32	8.32	8.32	0.0
4 <i>S</i>	6.14	6.69	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	0.0
4 <i>M</i>	5.91	5.75	8.4	8.45	8.45	8.45	8.32	8.32	8.414	8.45	0.051
4 <i>L</i>	5.83	5.3	5.99	6.09	7.41	7.85	7.85	5.99	7.038	7.85	0.831
4 <i>A</i>	5.23	4.91	4.59	4.93	4.5	5.17	4.69	4.5	4.776	5.17	0.244
5 <i>F</i>	5.37	5.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5 <i>S</i>	3.93	3.93	4.83	5.52	4.27	5.52	5.52	4.27	5.132	5.52	0.507
5 <i>M</i>	3.53	3.53	5.38	4.83	4.44	4.49	5.35	4.44	4.898	5.38	0.404
5 <i>L</i>	3.43	3.34	3.93	4.71	4.88	3.79	5.31	3.79	4.524	5.31	0.578
5 <i>A</i>	3.26	3.45	3.62	3.15	3.25	3.02	3.1	3.02	3.228	3.62	0.21

Tableau 6.2 – Instances 1 à 5 - durée des tournées - recuit simulé

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1F	-96.45	-96.45	-	-	-	-40.8	-	-40.8	-40.8	-40.8	0.0
1S	-114.03	-114.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1M	-117.8	-117.8	-57.36	-38.91	-61.52	-94.36	-75.67	-94.36	-65.56	-38.91	18.58
1L	-118.51	-118.51	-48.24	-105.44	-94.84	-82.65	-58.47	-105.44	-77.92	-48.24	21.56
1A	-118.51	-116.37	-112.58	-116.37	-98.8	-118.0	-118.51	-118.51	-112.85	-98.80	7.327
2F	-85.26	-85.26	4.35	4.35	-25.81	4.35	4.35	-25.81	-1.682	4.35	12.064
2S	-92.09	-92.09	-21.46	-21.46	-21.46	-49.59	-34.56	-49.59	-29.706	-21.46	11.162
2M	-104.81	-102.63	13.12	5.36	-81.58	15.1	-70.1	-81.58	-23.620	15.1	42.915
2L	-104.81	-106.06	-99.41	-100.43	-93.16	-88.72	-88.89	-100.43	-94.122	-88.72	5.005
2A	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.240	-117.24	0.0
3F	-56.7	-56.7	-	-	-	-	-23.9	-23.9	-23.9	-23.9	-
3S	-99.49	-99.49	-7.99	-7.99	-7.99	-7.99	-7.99	-7.99	-7.99	-7.99	0.0
3M	-106.59	-106.59	-5.2	-60.77	-5.2	-82.28	-81.21	-82.28	-46.932	-5.2	34.926
3L	-107.87	-104.72	-88.98	-18.15	-86.91	-100.91	-92.69	-100.91	-77.528	-18.15	30.0717
3A	-111.29	-92.22	-105.67	-112.39	-108.83	-108.83	-112.39	-112.39	-109.622	-105.67	2.538
4F	-63.08	-63.08	-9.6	-	-	-	-	-9.6	-9.6	-9.6	0.0
4S	-100.0	-99.43	0.72	34.09	34.09	34.09	34.09	0.72	27.416	34.09	13.348
4M	-105.42	-105.42	0.992	0.992	0.992	-39.82	-15.37	-39.82	-10.443	0.992	15.997
4L	-105.42	-96.96	-45.51	-98.46	-54.19	-9.92	-70.31	-98.46	-55.678	-9.92	29.133
4A	-105.42	-92.78	-89.5	-94.97	-103.05	-91.12	-92.48	-103.05	-94.224	-89.5	4.763
5F	-62.59	-62.59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5S	-76.29	-76.29	16.9	24.88	21.5	24.87	24.87	16.9	22.604	24.88	3.137
5M	-76.29	-76.29	-36.92	-	32.52	11.6	-22.42	-36.92	-3.805	32.52	27.386
5L	-84.21	-84.21	-59.42	-61.49	-58.4	-77.63	-43.71	-77.63	-60.130	-43.71	10.782
5A	-84.21	-43.74	-84.66	-83.25	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.378	-83.25	0.564

Tableau 6.3 – Instances 1 à 5 - préférence des patients - recuit simulé

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1 <i>F</i>	0.117	0.117	-	-	0.699	-	-	0.699	0.699	0.699	0.0
1 <i>S</i>	0.026	0.052	-	-	2.19	-	-	2.19	2.19	2.19	0.0
1 <i>M</i>	0.026	0.026	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.0
1 <i>L</i>	0.026	0.026	0.67	0.725	0.531	0.673	0.725	0.531	0.665	0.725	0.0710
1 <i>A</i>	0.0	0.026	0.323	0.401	0.44	0.285	0.376	0.285	0.365	0.44	0.055
2 <i>F</i>	0.037	0.037	0.481	0.481	0.481	0.481	0.481	0.481	0.481	0.481	0.0
2 <i>S</i>	0.025	0.025	0.666	0.666	0.555	0.666	0.666	0.555	0.644	0.666	0.044
2 <i>M</i>	0.025	0.025	0.444	0.444	0.444	0.444	0.444	0.444	0.444	0.444	0.0
2 <i>L</i>	0.012	0.025	0.321	0.16	1.04	1.04	0.801	0.16	0.672	1.04	0.369
2 <i>A</i>	0.012	0.012	0.234	0.259	0.358	0.333	0.345	0.234	0.306	0.358	0.049
3 <i>F</i>	0.154	0.154	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 <i>S</i>	0.064	0.064	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	0.0
3 <i>M</i>	0.038	0.064	0.372	0.372	0.372	0.372	0.372	0.372	0.372	0.372	0.0
3 <i>L</i>	0.038	0.013	1.22	0.654	1.22	1.22	0.705	0.654	1.004	1.220	0.265
3 <i>A</i>	0.038	0.026	0.41	0.15	0.46	0.46	0.5	0.15	0.396	0.5	0.126
4 <i>F</i>	0.942	0.942	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4 <i>S</i>	0.13	0.162	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942	0.942	0.0
4 <i>M</i>	0.13	0.049	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	0.0
4 <i>L</i>	0.081	0.032	0.601	0.861	0.861	0.861	0.292	0.292	0.6952	0.861	0.225
4 <i>A</i>	0.032	0.065	0.65	0.406	0.569	0.211	0.309	0.211	0.429	0.65	0.167
5 <i>F</i>	0.201	0.201	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5 <i>S</i>	0.063	0.038	0.339	0.339	0.339	0.339	0.339	0.339	0.339	0.339	0.0
5 <i>M</i>	0.038	0.063	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.690	0.690	0.690	0.0
5 <i>L</i>	0.025	0.025	1.46	0.226	1.46	0.954	0.891	0.226	0.9982	1.46	0.455
5 <i>A</i>	0.025	0.038	0.552	0.464	0.351	0.326	0.226	0.226	0.384	0.552	0.113

Tableau 6.4 – Instances 1 à 5 - équilibrage des tournées - recuit simulé

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1 <i>F</i>	5,13	5.13	5.44	5.41	5.14	5.57	5.14	5.14	5.34	5.57	0.17
1 <i>S</i>	3,55	3.55	3.55	3.57	3.66	3.65	3.57	3.55	3.6	3.66	0.05
1 <i>M</i>	3.55	3.55	3.56	3.55	3.55	3.65	3.56	3.55	3.57	3.65	0.04
1 <i>L</i>	3.44	3.44	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	0.0
1 <i>A</i>	3.16	3.16	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	0.0
2 <i>F</i>	4,98	4.98	10.66	5.05	5.08	4.98	5.05	4.98	6.16	10.66	2.25
2 <i>S</i>	4,27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.34	4.27	4.284	4.34	0.03
2 <i>M</i>	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	0.0
2 <i>L</i>	3.58	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	0.0
2 <i>A</i>	3.58	3.34	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	0.0
3 <i>F</i>	5,19	5.19	5.5	5.59	5.44	5.44	5.44	5.44	5.48	5.59	0.06
3 <i>S</i>	3,63	3.63	3.63	3.78	3.83	3.71	3.64	3.63	3.718	3.83	0.08
3 <i>M</i>	3.41	3.33	3.33	3.53	3.33	3.33	3.49	3.33	3.402	3.53	0.09
3 <i>L</i>	3.29	3.29	3.29	3.29	3.33	3.29	3.33	3.29	3.306	3.33	0.02
3 <i>A</i>	3.1	3.28	2.85	2.85	2.92	2.85	2.85	2.85	2.864	2.92	0.03
4 <i>F</i>	7,21	7.21	7.62	7.31	-	7.21	-	7.21	7.38	7.62	0.17
4 <i>S</i>	6,14	6.69	6.38	6.48	6.4	6.45	6.47	6.38	6.436	6.48	0.04
4 <i>M</i>	5.91	5.75	5.83	5.8	5.8	5.8	5.86	5.8	5.818	5.86	0.02
4 <i>L</i>	5.83	5.3	5.13	5.13	5.13	5.21	5.20	5.13	5.16	5.21	0.04
4 <i>A</i>	5.23	4.91	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	0.0
5 <i>F</i>	5,37	5.37	5.64	5.46	5.49	5.44	5.48	5.44	5.50	5.64	0.07
5 <i>S</i>	3,93	3.93	3.94	3.93	3.93	4.04	4.0	3.93	3.968	4.04	0.04
5 <i>M</i>	3,53	3.53	3.54	3.53	3.53	3.6	3.6	3.53	3.56	3.6	0.03
5 <i>L</i>	3.43	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	0.0
5 <i>A</i>	3.26	3.45	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	0.0

Tableau 6.5 – Instances 1 à 5 - durée des tournées - recherche locale itérée RW

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1 <i>F</i>	5,13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	0.0
1 <i>S</i>	3,55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	0.0
1 <i>M</i>	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	0.0
1 <i>L</i>	3.44	3.44	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	0.0
1 <i>A</i>	3.16	3.16	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	0.0
2 <i>F</i>	4,98	4.98	4.98	5.02	4.98	4.98	5.02	4.98	5.0	5.02	0.02
2 <i>S</i>	4,27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	0.0
2 <i>M</i>	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	0.0
2 <i>L</i>	3.58	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	0.0
2 <i>A</i>	3.58	3.34	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	0.0
3 <i>F</i>	5,19	5.19	5.38	5.33	5.28	5.44	5.37	5.28	5.36	5.44	0.05
3 <i>S</i>	3,63	3.63	3.64	3.63	3.63	3.63	3.64	3.63	3.63	3.64	0.005
3 <i>M</i>	3.41	3.33	3.33	3.33	3.53	3.33	3.33	3.33	3.37	3.53	0.08
3 <i>L</i>	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	0.0
3 <i>A</i>	3.1	3.28	2.85	2.91	2.91	2.85	2.85	2.85	2.87	2.91	0.03
4 <i>F</i>	7,21	7.21	7.78	7.21	7.31	7.78	7.21	7.21	7.458	7.78	0.27
4 <i>S</i>	6,14	6.69	6.14	6.38	6.27	6.16	6.27	6.14	6.244	6.38	0.09
4 <i>M</i>	5.91	5.75	5.75	5.8	5.8	5.75	5.8	5.75	5.78	5.8	0.02
4 <i>L</i>	5.83	5.3	5.2	5.13	5.13	5.18	5.13	5.13	5.154	5.2	0.03
4 <i>A</i>	5.23	4.91	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	0.0
5 <i>F</i>	5,37	5.37	5.38	5.37	5.37	5.42	5.38	5.37	5.38	5.42	0.02
5 <i>S</i>	3,93	3.93	3.93	3.94	3.94	3.93	3.93	3.93	3.934	3.94	0.01
5 <i>M</i>	3,53	3.53	3.53	3.60	3.53	3.62	3.53	3.53	3.56	3.62	1.2
5 <i>L</i>	3.43	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	0.0
5 <i>A</i>	3.26	3.45	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	0.0

Tableau 6.6 – Instances 1 à 5 - durée des tournées - recherche locale itérée BW

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1 <i>F</i>	5,13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	5.13	0.0
1 <i>S</i>	3,55	3.55	3.55	3.66	3.55	3.55	3.55	3.55	3.57	3.66	0.04
1 <i>M</i>	3.55	3.55	3.56	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.56	0.01
1 <i>L</i>	3.44	3.44	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	3.39	0.0
1 <i>A</i>	3.16	3.16	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	3.12	0.0
2 <i>F</i>	4,98	4.98	5.01	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.99	5.01	0.01
2 <i>S</i>	4,27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	0.0
2 <i>M</i>	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	0.0
2 <i>L</i>	3.58	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	0.0
2 <i>A</i>	3.58	3.34	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97	0.0
3 <i>F</i>	5,19	5.19	5.37	5.44	5.38	5.44	5.33	5.33	5.39	5.44	0.04
3 <i>S</i>	3,63	3.63	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64	3.6	3.64	0.0
3 <i>M</i>	3.41	3.33	3.52	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33	3.368	3.52	0.08
3 <i>L</i>	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	0.0
3 <i>A</i>	3.1	3.28	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	0.0
4 <i>F</i>	7,21	7.21	7.23	8.28	7.21	7.34	7.31	7.21	7.47	8.28	0.40
4 <i>S</i>	6,14	6.69	6.32	6.16	6.3	6.16	6.16	6.16	6.22	6.32	0.07
4 <i>M</i>	5.91	5.75	5.75	5.75	5.8	5.88	5.75	5.75	5.786	5.88	0.05
4 <i>L</i>	5.83	5.3	5.20	5.17	5.13	5.21	5.13	5.13	5.168	5.21	0.03
4 <i>A</i>	5.23	4.91	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	0.0
5 <i>F</i>	5,37	5.37	5.38	5.37	5.38	5.37	5.38	5.37	5.38	5.38	0.01
5 <i>S</i>	3,93	3.93	3.93	3.93	3.94	3.94	3.93	3.93	3.934	3.94	0.01
5 <i>M</i>	3,53	3.53	3.53	3.62	3.62	3.6	3.53	3.53	3.58	3.62	0.04
5 <i>L</i>	3.43	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	0.0
5 <i>A</i>	3.26	3.45	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	0.0

Tableau 6.7 – Instances 1 à 5 - durée des tournées - recherche locale itérée MW

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1F	-96,45	-96.45	-62.73	-57.24	-52.25	-74.0	-64.15	-74.0	-62.07	-52.25	7.31
1S	-114,03	-114.03	-99.14	-104.19	-104.19	-109.16	-106.33	-109.16	-104.60	-99.14	3.28
1M	-117,8	-117.8	-117.8	-114.03	-115.11	-117.8	-113.15	-117.8	-115.58	-113.15	1.92
1L	-118,51	-118.51	-117.8	-118.51	-117.8	-118.51	-116.17	-118.51	-117.76	-116.17	0.86
1A	-118.51	-116.37	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	0.0
2F	-85,26	-85.26	-76.24	-67.17	-82.96	-73.7	-78.03	-82.96	-75.62	-67.17	5.20
2S	-92,09	-92.09	-90.88	-92.09	-89.02	-90.07	-89.17	-92.09	-90.25	-89.02	1.14
2M	-104.81	-102.63	-101.99	-104.19	-104.81	-104.81	-102.42	-104.81	-103.64	-101.99	1.20
2L	-104.81	-106.06	-105.53	-105.85	-104.72	-104.19	-105.34	-105.85	-105.13	-104.19	0.596
2A	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.23	-117.24	0.0
3F	-56,7	-56.7	-	-29.97	-42.69	-21.52	-34.29	-42.69	-32.12	-21.52	7.639
3S	-99,49	-99.49	-89.54	-90.76	-94.1	-94.85	-88.35	-94.85	-91.52	-88.35	2.541
3M	-106,59	-106.59	-106.59	-103.09	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-105.89	-103.09	1.4
3L	-107,87	-104.72	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	0.0
3A	-111.29	-92.22	-111.51	-111.51	-111.51	-112.39	-112.39	-112.39	-111.86	-111.51	0.431
4F	-63,08	-63.08	-	-33.76	-	-50.12	-6.77	-50.12	-30.22	-6.77	17.87
4S	-100	-99.43	-65.49	-73.79	-69.57	-66.56	-61.47	-73.79	-67.38	-61.47	4.12
4M	-105.42	-105.42	-84.34	-78.8	-80.51	-81.12	-93.8	-93.8	-83.71	-78.8	5.35
4L	-105.42	-96.96	-101.82	-96.89	-97.35	-100.95	-95.11	-101.82	-98.42	-95.11	2.55
4A	-105.42	-92.78	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	0.0
5F	-62,59	-62.59	-28.97	-33.55	-22.15	-41.64	-40.09	-41.64	-33.28	-22.15	7.19
5S	-76,29	-76.29	-65.21	-76.29	-73.35	-70.13	-67.97	-76.29	-70.59	-65.21	3.90
5M	-76,29	-76.29	-76.29	-75.87	-72.29	-76.29	-76.29	-76.29	-75.40	-72.29	1.57
5L	-84,21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	0.0
5A	-84.21	-43.74	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	0.0

Tableau 6.8 – Instances 1 à 5 - préférence des patients - recherche locale itérée RW

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1F	-96,45	-96.45	-89.24	-76.17	-61.25	-92.12	-90.19	-92.12	-81.79	-61.25	11.72
1S	-114,03	-114.03	-111.15	-114.03	-114.03	-111.01	-114.03	-114.03	-112.85	-111.01	1.45
1M	-117,8	-117.8	-117.8	-117.8	-117.8	-117.8	-117.8	-117.8	-117.8	-117.8	0.0
1L	-118,51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	0.0
1A	-118.51	-116.37	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	0.0
2F	-85,26	-85.26	-83.28	-83.28	-85.05	-85.26	-83.16	-85.26	-84.006	-83.16	0.94
2S	-92,09	-92.09	-92.09	-92.09	-90.5	-91.86	-91.89	-92.09	-91.69	-90.5	0.6
2M	-104.81	-102.63	-104.81	-104.81	-104.81	-104.81	-104.81	-104.81	-104.81	-104.81	0.0
2L	-104.81	-106.06	-105.53	-107.64	-106.06	-107.64	-107.64	-107.64	-106.90	-105.53	0.92
2A	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	0.0
3F	-56,7	-56.7	-50.1	-39.0	-54.33	-40.48	-16.19	-54.33	-40.02	-16.19	13.23
3S	-99,49	-99.49	-97.95	-99.49	-96.2	-96.11	-98.38	-99.49	-97.626	-96.11	1.3
3M	-106,59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	0.0
3L	-107,87	-104.72	-106.59	-107.87	-107.87	-107.87	-107.87	-107.87	-107.614	-106.59	0.51
3A	-111.29	-92.22	-112.39	-112.5	-112.39	-111.51	-111.51	-112.5	-112.06	-111.51	0.45
4F	-63,08	-63.08	-34.79	-56.61	-41.69	-33.32	-	-56.61	-41.6025	-33.32	9.22
4S	-100	-99.43	-83.12	-95.36	-95.13	-89.19	-95.36	-95.36	-91.632	-83.12	4.87
4M	-105.42	-105.42	-93.95	-94.28	-104.87	-91.54	-106.72	-106.72	-98.27	-91.54	6.24
4L	-105.42	-96.96	-109.27	-109.27	-106.76	-109.27	-109.27	-109.27	-108.768	-106.76	1.0
4A	-105.42	-92.78	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	-111.7	-111.74	0.0
5F	-62,59	-62.59	-52.59	-56.38	-55.99	-60.65	-54.44	-60.65	-56.01	-52.59	2.68
5S	-76,29	-76.29	-76.29	-76.29	-74.55	-70.49	-46.29	-76.29	-68.78	-46.29	11.44
5M	-76,29	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	0.0
5L	-84,21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	0.0
5A	-84.21	-43.74	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	0.0

Tableau 6.9 – Instances 1 à 5 - préférence des patients - recherche locale itérée BW

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1F	-96,45	-96.45	-75.98	-90.55	-90.55	-96.45	-96.45	-96.45	-90.00	-75.98	7.49
1S	-114,03	-114.03	-111.53	-114.03	-112.68	-114.03	-114.03	-114.03	-113.26	-111.53	1.01
1M	-117,8	-117.8	-117.8	-117.8	-117.8	-117.8	-117.8	-117.8	-117.8	-117.8	0.0
1L	-118,51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	0.0
1A	-118.51	-116.37	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	-118.51	0.0
2F	-85,26	-85.26	-85.26	-77.28	-82.96	-85.26	-82.96	-85.26	-82.744	-77.28	2.92
2S	-92,09	-92.09	-91.89	-91.89	-90.5	-92.09	-91.89	-92.09	-91.652	-90.5	0.58
2M	-104.81	-102.63	-104.81	-104.81	-104.81	-104.81	-104.81	-104.81	-104.81	-104.81	0.0
2L	-104.81	-106.06	-107.64	-107.64	-107.64	-105.53	-107.64	-107.64	-107.218	-105.53	0.84
2A	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	-117.24	0.0
3F	-56,7	-56.7	-30.66	-47.99	-41.97	-55.14	-51.2	-55.14	-45.392	-30.66	8.54
3S	-99,49	-99.49	-97.95	-96.2	-98.38	-98.38	-99.49	-99.49	-98.08	-96.2	1.07
3M	-106,59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	-106.59	0.0
3L	-107,87	-104.72	-107.87	-107.87	-107.87	-107.87	-106.59	-107.87	-107.614	-106.59	0.51
3A	-111.29	-92.22	-111.51	-112.5	-112.5	-111.51	-112.39	-112.5	-112.082	-111.51	0.47
4F	-63,08	-63.08	-20.39	-	-31.76	-51.15	-9.6	-51.15	-28.22	-9.6	15.38
4S	-100	-99.43	-88.33	-96.52	-91.79	-95.13	-89.69	-96.52	-92.292	-88.33	3.12
4M	-105.42	-105.42	-95.36	-96.47	-94.52	-98.38	-98.1	-98.38	-96.566	-94.52	1.5
4L	-105.42	-96.96	-109.27	-109.27	-109.27	-106.76	-106.76	-109.27	-108.27	-106.76	1.23
4A	-105.42	-92.78	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	-111.74	0.0
5F	-62,59	-62.59	-51.24	-51.84	-54.44	-54.33	-54.36	-54.44	-53.24	-51.24	1.4
5S	-76,29	-76.29	-76.29	-74.52	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	-75.936	-74.52	0.71
5M	-76,29	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	-76.29	0.0
5L	-84,21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	-84.21	0.0
5A	-84.21	-43.74	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	-84.66	0.0

Tableau 6.10 – Instances 1 à 5 - préférence des patients - recherche locale itérée MW

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1 <i>F</i>	0,117	0.117	0.324	0.220	0.298	0.155	0.207	0.155	0.241	0.324	0.062
1 <i>S</i>	0.026	0.052	0.065	0.052	0.039	0.052	0.052	0.039	0.052	0.065	0.008
1 <i>M</i>	0.026	0.026	0.065	0.026	0.052	0.052	0.078	0.026	0.055	0.078	0.017
1 <i>L</i>	0.026	0.026	0.039	0.039	0.039	0.052	0.026	0.026	0.039	0.052	0.008
1 <i>A</i>	0	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.02	0.0
2 <i>F</i>	0,037	0.037	0.086	0.049	0.049	0.123	0.0620	0.049	0.074	0.123	0.028
2 <i>S</i>	0.025	0.025	0.037	0.037	0.0620	0.049	0.074	0.037	0.052	0.074	0.014
2 <i>M</i>	0.025	0.025	0.049	0.037	0.037	0.049	0.037	0.037	0.042	0.049	0.006
2 <i>L</i>	0.012	0.025	0.037	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.027	0.037	0.005
2 <i>A</i>	0.012	0.012	0.024	0.024	0.024	0.012	0.037	0.012	0.024	0.037	0.008
3 <i>F</i>	0,154	0.154	1.0	0.564	0.744	1.29	1.22	0.564	0.963	1.29	0.276
3 <i>S</i>	0.064	0.064	0.154	0.051	0.141	0.103	0.064	0.051	0.103	0.154	0.041
3 <i>M</i>	0.038	0.064	0.115	0.090	0.025	0.115	0.103	0.025	0.09	0.115	0.034
3 <i>L</i>	0.038	0.013	0.064	0.103	0.077	0.013	0.064	0.013	0.064	0.103	0.028
3 <i>A</i>	0.038	0.025	0.025	0.064	0.038	0.064	0.064	0.025	0.051	0.064	0.016
4 <i>F</i>	0,942	0.942	-	1.82	1.33	-	1.71	1.33	1.62	1.82	0.21
4 <i>S</i>	0.13	0.162	0.601	0.114	0.227	0.325	0.422	0.114	0.338	0.601	0.167
4 <i>M</i>	0.13	0.049	0.179	0.065	0.13	0.081	0.097	0.065	0.11	0.179	0.04
4 <i>L</i>	0.081	0.032	0.065	0.081	0.097	0.049	0.065	0.049	0.071	0.097	0.016
4 <i>A</i>	0.032	0.065	0.032	0.032	0.049	0.016	0.032	0.016	0.032	0.049	0.01
5 <i>F</i>	0,037	0.201	0.351	0.201	0.314	0.226	0.389	0.201	0.296	0.389	0.072
5 <i>S</i>	0.063	0.038	0.063	0.1	0.113	0.075	0.063	0.063	0.082	0.113	0.02
5 <i>M</i>	0.038	0.063	0.038	0.1	0.038	0.063	0.088	0.038	0.065	0.1	0.025
5 <i>L</i>	0.025	0.025	0.063	0.063	0.038	0.013	0.013	0.013	0.038	0.063	0.022
5 <i>A</i>	0.025	0.038	0.038	0.025	0.038	0.025	0.038	0.025	0.032	0.038	0.006

Tableau 6.11 – Instances 1 à 5 - équilibrage des tournées - recherche locale itérée RW

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1 <i>F</i>	0,117	0.117	0.181	0.129	0.117	0.181	0.117	0.117	0.145	0.181	0.03
1 <i>S</i>	0.026	0.052	0.052	0.039	0.026	0.026	0.026	0.026	0.038	0.052	0.010
1 <i>M</i>	0.026	0.026	0.052	0.026	0.039	0.026	0.039	0.026	0.036	0.052	0.01
1 <i>L</i>	0.026	0.026	0.052	0.039	0.026	0.026	0.0	0.0	0.029	0.052	0.017
1 <i>A</i>	0	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.0
2 <i>F</i>	0,037	0.037	0.123	0.074	0.074	0.086	0.049	0.049	0.081	0.123	0.024
2 <i>S</i>	0.025	0.025	0.025	0.037	0.062	0.062	0.049	0.025	0.047	0.062	0.014
2 <i>M</i>	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.026	0.037	0.025	0.027	0.037	0.005
2 <i>L</i>	0.012	0.025	0.025	0.025	0.037	0.012	0.025	0.012	0.025	0.037	0.008
2 <i>A</i>	0.012	0.012	0.012	0.012	0.025	0.025	0.025	0.012	0.02	0.025	0.006
3 <i>F</i>	0,154	0.154	0.654	0.859	0.5	0.705	0.218	0.218	0.587	0.859	0.217
3 <i>S</i>	0.064	0.064	0.103	0.077	0.090	0.115	0.154	0.077	0.108	0.154	0.026
3 <i>M</i>	0.038	0.064	0.051	0.051	0.064	0.090	0.064	0.051	0.064	0.090	0.014
3 <i>L</i>	0.038	0.013	0.038	0.038	0.09	0.026	0.051	0.026	0.049	0.090	0.022
3 <i>A</i>	0.038	0.026	0.038	0.026	0.051	0.026	0.026	0.026	0.033	0.051	0.001
4 <i>F</i>	0,942	0.942	-	-	1.02	1.33	2.19	1.02	1.51	2.19	0.494
4 <i>S</i>	0.13	0.162	0.065	0.097	0.195	0.179	0.179	0.065	0.143	0.195	0.052
4 <i>M</i>	0.13	0.049	0.049	0.114	0.114	0.162	0.049	0.049	0.098	0.162	0.043
4 <i>L</i>	0.081	0.032	0.065	0.016	0.049	0.049	0.016	0.016	0.039	0.065	0.019
4 <i>A</i>	0.032	0.065	0.049	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.023	0.049	0.013
5 <i>F</i>	0,037	0.201	0.289	0.201	0.201	0.201	0.201	0.201	0.219	0.289	0.035
5 <i>S</i>	0.063	0.038	0.05	0.63	0.05	0.1	0.05	0.05	0.176	0.63	0.228
5 <i>M</i>	0.038	0.063	0.038	0.038	0.05	0.038	0.038	0.038	0.04	0.05	0.005
5 <i>L</i>	0.025	0.025	0.05	0.038	0.025	0.038	0.025	0.025	0.035	0.05	0.009
5 <i>A</i>	0.025	0.038	0.013	0.025	0.013	0.013	0.013	0.013	0.015	0.025	0.005

Tableau 6.12 – Instances 1 à 5 - équilibrage des tournées - recherche locale itérée BW

	<i>BK</i>	Bredstrom	Repl.1	Repl.2	Repl.3	Repl.4	Repl.5	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	σ
1 <i>F</i>	0,117	0.117	0.181	0.130	0.130	0.207	0.130	0.130	0.156	0.207	0.032
1 <i>S</i>	0.026	0.052	0.052	0.026	0.052	0.052	0.052	0.026	0.047	0.052	0.010
1 <i>M</i>	0.026	0.026	0.026	0.039	0.039	0.026	0.026	0.026	0.031	0.039	0.006
1 <i>L</i>	0.026	0.026	0.0	0.026	0.039	0.078	0.026	0.0	0.034	0.078	0.025
1 <i>A</i>	0	0.026	0.0	0.026	0.026	0.026	0.026	0.0	0.021	0.026	0.010
2 <i>F</i>	0,037	0.037	0.037	0.062	0.074	0.062	0.062	0.037	0.059	0.074	0.012
2 <i>S</i>	0.025	0.025	0.037	0.049	0.037	0.037	0.049	0.037	0.042	0.049	0.006
2 <i>M</i>	0.025	0.025	0.049	0.037	0.012	0.037	0.012	0.012	0.029	0.049	0.015
2 <i>L</i>	0.012	0.025	0.025	0.012	0.025	0.037	0.025	0.012	0.025	0.037	0.008
2 <i>A</i>	0.012	0.012	0.012	0.025	0.012	0.012	0.012	0.012	0.015	0.025	0.006
3 <i>F</i>	0,154	0.154	0.192	0.410	0.231	0.449	0.231	0.192	0.303	0.449	0.105
3 <i>S</i>	0.064	0.064	0.077	0.192	0.141	0.013	0.077	0.013	0.1	0.192	0.061
3 <i>M</i>	0.038	0.064	0.064	0.090	0.064	0.064	0.013	0.013	0.059	0.09	0.025
3 <i>L</i>	0.038	0.013	0.026	0.077	0.038	0.077	0.09	0.026	0.062	0.090	0.025
3 <i>A</i>	0.038	0.026	0.038	0.013	0.013	0.038	0.051	0.013	0.031	0.051	0.015
4 <i>F</i>	0,942	0.942	1.33	1.33	0.942	0.942	1.33	0.942	1.17	1.33	0.19
4 <i>S</i>	0.13	0.162	0.146	0.114	0.1460	0.114	0.114	0.114	0.127	0.146	0.016
4 <i>M</i>	0.13	0.049	0.032	0.162	0.081	0.065	0.065	0.032	0.081	0.162	0.044
4 <i>L</i>	0.081	0.032	0.049	0.049	0.016	0.049	0.049	0.016	0.042	0.049	0.013
4 <i>A</i>	0.032	0.065	0.016	0.032	0.016	0.016	0.016	0.016	0.019	0.032	0.006
s5 <i>F</i>	0,037	0.201	0.201	0.213	0.201	0.201	0.289	0.201	0.221	0.289	0.034
5 <i>S</i>	0.063	0.038	0.05	0.1	0.088	0.038	0.038	0.038	0.063	0.1	0.026
5 <i>M</i>	0.038	0.063	0.088	0.063	0.063	0.063	0.025	0.025	0.06	0.088	0.020
5 <i>L</i>	0.025	0.025	0.025	0.025	0.038	0.025	0.05	0.025	0.033	0.05	0.010
5 <i>A</i>	0.025	0.038	0.013	0.013	0.038	0.013	0.013	0.013	0.018	0.038	0.010

Tableau 6.13 – Instances 1 à 5 - équilibrage des tournées - recherche locale itérée MW

	<i>BW</i>					<i>MW</i>				
	<i>1L</i>	<i>2L</i>	<i>3L</i>	<i>4L</i>	<i>5L</i>	<i>1L</i>	<i>2L</i>	<i>3L</i>	<i>4L</i>	<i>5L</i>
Répl. 1	4.21	4.25	4.06	5.98	3.85	3.91	4.19	4.14	5.87	4.18
Répl. 2	4.13	4.08	3.9	5.72	3.95	4.25	4.02	4.29	5.99	4.21
Répl. 3	4.14	4.06	4.26	5.9	4.12	4.29	4.08	4.22	6.16	4.15
Répl. 4	4.04	4.12	4.21	6.01	4.22	4.04	4.11	4.1	6.12	3.98
Répl. 5	4.01	4.12	4.29	6.12	4.02	4.21	4.0	4.2	6.06	4.14
Répl. 6	3.91	4.04	3.78	6.01	3.8	4.01	4.22	4.18	6.12	4.18
Répl. 7	4.24	4.02	3.97	6.01	4.18	4.22	4.04	4.18	5.88	4.1
Répl. 8	4.14	3.96	4.19	6.12	3.99	4.04	4.02	4.03	6.14	3.99
Répl. 9	4.2	4.2	3.63	6.06	3.87	4.18	4.15	4.27	6.01	4.17
Répl. 10	4.04	4.17	4.28	5.93	4.08	3.96	4.19	4.36	6.19	4.31
Répl. 11	4.04	4.02	4.08	6.04	3.92	4.25	4.02	4.33	5.99	4.12
Répl. 12	4.24	4.02	4.24	6.03	4.05	4.25	4.12	3.67	6.16	4.03
Répl. 13	3.91	4.01	4.17	5.69	4.03	3.91	4.04	3.92	5.88	4.23
Répl. 14	4.04	4.02	3.97	5.96	3.85	4.33	4.02	4.21	6.37	4.13
Répl. 15	4.26	4.07	3.9	5.93	3.88	4.27	4.29	4.24	6.19	4.15
Répl. 16	4.14	4.13	4.17	5.9	4.02	4.14	4.17	4.36	6.19	4.09
Répl. 17	4.25	4.13	4.17	6.19	3.88	3.91	4.15	4.21	6.24	4.13
Répl. 18	4.08	4.15	3.96	5.69	3.8	4.13	4.02	4.14	6.05	4.26
Répl. 19	4.01	3.99	3.67	6.25	4.08	4.04	4.09	4.31	6.01	4.27
Répl. 20	3.91	4.15	4.03	6.06	3.99	4.04	3.98	3.95	5.88	4.07
Min	3.91	3.96	3.63	5.69	3.8	3.91	3.98	3.67	5.87	3.98
Moy.	4.10	4.09	4.05	5.98	3.98	4.12	4.10	4.17	6.07	4.14
Max	4.26	4.25	4.29	6.25	4.22	4.33	4.29	4.36	6.37	4.31

Tableau 6.14 – Instance 1L à 5L - durée et équilibrage des tournées - recherche locale itérée *BW*, *MW*

	Bredstrom	Repl. 1	Repl. 2	Repl. 3	Repl. 4	Repl. 5	<i>min</i>	<i>moy.</i>	<i>max</i>	σ
1 <i>S</i>	13.69	11.14	11.89	12.15	12.13	11.33	11.14	11.73	12.15	0.42
1 <i>M</i>	12.8	10.38	10.57	10.94	10.55	10.66	10.38	10.62	10.94	0.18
1 <i>L</i>	11.87	9.76	10.14	10.17	10.03	9.91	9.76	10.00	10.17	0.15
1 <i>A</i>	11.88	8.78	8.61	8.58	8.97	8.33	8.33	8.65	8.97	0.21
2 <i>S</i>	15.06	11.85	11.93	11.83	12.37	11.98	11.83	11.99	12.37	0.20
2 <i>M</i>	13.45	11.09	10.93	10.48	10.19	10.1	10.1	10.50	11.09	0.38
2 <i>L</i>	11.52	9.73	9.76	10.41	9.89	9.83	9.73	9.92	10.41	0.25
2 <i>A</i>	12.41	8.31	8.76	8.83	7.97	8.55	7.97	8.48	8.83	0.31
3 <i>S</i>	-	12.57	11.91	11.46	12.24	12.37	11.46	12.11	12.57	0.39
3 <i>M</i>	-	10.24	10.4	10.77	11.28	10.72	10.24	10.68	11.28	0.36
3 <i>L</i>	15.16	9.67	10.06	9.89	10.05	10.01	9.67	9.94	10.06	0.14
3 <i>A</i>	13.01	8.56	8.83	8.69	8.41	9.0	8.41	8.70	9.0	0.21
4 <i>S</i>	-	14.85	15.26	15.8	15.36	15.39	14.85	15.33	15.8	0.30
4 <i>M</i>	-	13.72	14.34	14.32	13.69	13.91	13.69	14.00	14.34	0.28
4 <i>L</i>	20.68	13.6	13.13	13.23	13.38	13.49	13.13	13.37	13.6	0.17
4 <i>A</i>	22.89	11.44	11.16	11.67	11.46	11.58	11.16	11.46	11.67	0.17
5 <i>S</i>	16.24	13.09	12.42	12.83	13.66	13.24	12.42	13.5	13.66	0.41
5 <i>M</i>	15.33	12.08	11.7	11.61	11.82	12.22	11.61	11.89	12.22	0.23
5 <i>L</i>	17.61	11.0	11.71	11.54	11.58	11.62	11.0	11.49	11.71	0.25
5 <i>A</i>	17.59	10.33	10.41	10.09	10.05	9.81	9.81	10.14	10.41	0.21

Tableau 6.15 – Instances 6 à 10 - durée et équilibrage des tournées - recherche locale itérée *BW*

	Bredstrom	Repl. 1	Repl. 2	Repl. 3	Repl. 4	Repl. 5	<i>min</i>	<i>moy.</i>	<i>max</i>	σ
1 <i>S</i>	13.69	11.85	12.05	12.69	12.31	12.55	11.85	12.29	12.69	0.31
1 <i>M</i>	12.8	11.53	11.35	11.22	10.82	11.15	10.82	11.21	11.53	0.23
1 <i>L</i>	11.87	10.39	10.6	10.54	9.72	10.57	9.72	10.36	10.6	0.33
1 <i>A</i>	11.88	9.51	8.88	9.38	9.31	9.35	8.88	9.29	9.51	0.21
2 <i>S</i>	15.06	12.15	11.86	11.71	12.51	12.31	11.71	12.11	12.51	0.29
2 <i>M</i>	13.45	11.05	10.2	10.39	10.8	11.26	10.2	10.74	11.26	0.40
2 <i>L</i>	11.52	10.37	9.61	10.05	10.29	10.18	9.61	10.10	10.37	0.27
2 <i>A</i>	12.41	8.84	8.63	8.83	9.23	9.24	8.63	8.95	9.24	0.24
3 <i>S</i>	-	12.26	11.84	12.92	12.58	12.32	11.84	12.38	12.92	0.36
3 <i>M</i>	-	10.48	11.26	10.74	10.4	11.32	10.4	10.84	11.32	0.38
3 <i>L</i>	15.16	10.31	10.46	10.35	10.53	10.38	10.31	10.41	10.53	0.08
3 <i>A</i>	13.01	8.70	8.87	9.0	9.04	9.08	8.70	8.94	9.08	0.14
4 <i>S</i>	-	15.18	15.62	15.78	16.38	15.97	15.18	15.79	16.38	0.40
4 <i>M</i>	-	14.62	14.33	14.49	13.83	14.47	13.83	14.34	14.62	0.27
4 <i>L</i>	20.68	13.71	13.6	13.25	13.6	13.68	13.25	13.57	13.71	0.16
4 <i>A</i>	22.89	11.53	12.17	12.3	12.38	11.99	11.53	12.07	12.38	0.30
5 <i>S</i>	16.24	13.27	12.76	13.67	13.62	13.2	12.76	13.30	13.67	0.33
5 <i>M</i>	15.33	12.09	11.96	11.63	12.68	12.23	11.63	12.12	12.68	0.34
5 <i>L</i>	17.61	11.51	11.46	11.47	11.57	11.71	11.46	11.54	11.71	0.09
5 <i>A</i>	17.59	10.37	10.32	9.84	10.38	10.72	9.84	10.33	10.72	0.28

Tableau 6.16 – Instances 6 à 10 - durée et équilibrage des tournées - recherche locale itérée *MW*

Annexe 2 - Résultat sur nos petites instances

Comme nous l'avons fait dans l'annexe 1, le tableau 6.17 structure cette annexe en donnant la référence du tableau suivant l'ordre de priorité des critères de performance, le nombre de type de ressource, le pourcentage d'activités synchronisées et le critère d'acceptation de la recherche locale utilisée.

Crit. 1	Crit. 2	Crit. 3	Nb types de ress.	% act. sync.	<i>BW</i>	<i>MW</i>
Comp.	Dep.	Dist.	1	10	6.18	6.19
				20	6.20	6.21
			2	10	6.22	6.23
				20	6.24	6.25
Dep.	Comp.	Dist.	1	10	6.26	6.27
				20	6.28	6.29
			2	10	6.30	6.31
				20	6.32	6.33
Dist.	Dep.	Comp.	1	10	6.34	6.35
				20	6.36	6.37
			2	10	6.38	6.39
				20	6.40	6.41
Comp.	Dist.	Dep.	1	10	6.42	6.43
				20	6.44	6.45
			2	10	6.46	6.47
				20	6.48	6.49
Dep.	Dist.	Comp.	1	10	6.50	6.51
				20	6.52	6.53
			2	10	6.54	6.55
				20	6.56	6.57
Dist.	Comp.	Dep.	1	10	6.58	6.59
				20	6.60	6.61
			2	10	6.62	6.63
				20	6.64	6.65

Tableau 6.17 – Tableau des tableaux de résultats - petites instances

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Comp.	Dep.	Dist.	GAP	temps(s)	Comp.	Dep .	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.
1S	4.962	16	492	0%	0.44	4.962	16	492	0%	0%	0%
1M	4.621	17	482	0%	0.36	4.621	17	482	0%	0%	0%
1L	4.621	17	481	0%	0.81	4.621	17	482	0%	0%	0.21%
2S	4.018	20	524	0%	0.11	4.018	20	524	0%	0%	0%
2M	3.915	21	479	0%	0.36	3.915	21	479	0%	0%	0%
2L	3.834	24	440	0%	1.32	3.847	20	438	0.34%	-	-
3S	5.007	15	480	0%	0.08	5.007	15	480	0%	0%	0%
3M	4.884	17	429	0%	0.35	4.884	17	434	0%	0%	1.17%
3L	4.884	17	404	0%	0.63	4.884	17.0	409	0%	0%	1.24%
4S	5.489	19	484	0%	0.18	5.489	19	484	0%	0%	0%
4M	5.333	20	514	0%	1.20	5.707	19	502	7.01%	-	-
4L	5.2	22	454	0%	34.81	5.418	21	438	4.19%	-	-
5S	4.484	17	485	0%	0.20	4.484	17	485	0%	0%	0%
5M	4.164	17	423	0%	0.26	4.164	17	423	0%	0%	0%
5L	4.088	17	456	0%	0.76	4.12	15	429	0.72%	-	-

Tableau 6.18 – Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Comp.	Dep.	Dist.	GAP	temps(s)	Comp.	Dep .	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.
1S	4.962	16	492	0%	0.44	4.962	16	492	0%	0%	0%
1M	4.621	17	482	0%	0.36	4.621	17	482	0%	0%	0%
1L	4.621	17	481	0%	0.81	4.621	17	482	0%	0%	0.21%
2S	4.018	20	524	0%	0.11	4.018	20	524	0%	0%	0%
2M	3.915	21	479	0%	0.36	3.915	21	479	0%	0%	0%
2L	3.834	24	440	0%	1.32	3.847	20	438	0.34%	-	-
3S	5.007	15	480	0%	0.08	5.007	15	480	0%	0%	0%
3M	4.884	17	429	0%	0.35	4.884	17	434	0%	0%	1.16%
3L	4.884	17	404	0%	0.63	4.884	17	409	0%	0%	1.23%
4S	5.489	19	484	0%	0.18	5.489	19	484	0%	0%	0%
4M	5.333	20	514	0%	1.2	5.489	19	484	2.92%	-	-
4L	5.2	22	454	0%	34.81	5.418	21	438	4.19%	-	-
5S	4.484	17	485	0%	0.2	4.484	17	485	0%	0%	0%
5M	4.164	17	423	0%	0.26	4.164	17	423	0%	0%	0%
5L	4.088	17	456	0	0.76	4.12	15	429	0.78%	-	-

Tableau 6.19 – Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					MW			GAP		
	Comp.	Dep.	Dist.	GAP	temps(s)	Comp.	Dep .	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.
1S	6.005	16	545	0%	0.21	6.005	16	545	0%	0%	0%
1M	5.747	19	531	0%	0.22	5.747	19	531	0%	0%	0%
1L	5.747	19	531	0%	0.65	5.747	19	531	0%	0%	0%
2S	5.141	21	553	0%	0.21	5.141	21	553	0%	0%	0%
2M	4.366	23	543	0%	0.74	4.366	23	543	0%	0%	0%
2L	4.263	24	499	0%	39.1	4.366	23	473	2.42%	-	-
3S	6.335	18	495	0%	0.34	6.693	17	483	5.65%	-	-
3M	5.732	17	496	0%	0.65	5.74	17	521	0.14%	-	-
3L	5.715	21	469	0%	10.9	5.715	21	469	0%	0%	0%
5S	5.07	16	538	0%	0.27	5.111	17	515	0.81%	-	-
5M	4.688	19	476	0%	0.43	4.688	19	476	0%	0%	0%
5L	4.568	17	488	0%	2.09	4.601	17	438	0.72%	-	-

Tableau 6.20 – Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - BW

	PLNE					MW			GAP		
	Comp.	Dep.	Dist.	GAP	temps(s)	Comp.	Dep .	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.
1S	6.005	16	545	0%	0.21	6.005	16	545	0%	0%	0%
1M	5.747	19	531	0%	0.22	5.747	19	531	0%	0%	0%
1L	5.747	19	531	0%	0.65	5.747	19	531	0%	0%	0%
2S	5.141	21	553	0%	0.21	5.141	21	553	0%	0%	0%
2M	4.366	23	543	0%	0.74	4.366	23	543	0%	0%	0%
2L	4.263	24	499	0%	39.1	4.366	23	473	2.42%	-	-
3S	6.335	18	495	0%	0.34	6.665	17	480	5.21%	0%	0%
3M	5.732	17	496	0%	0.65	5.773	17	469	0.72%	0%	0%
3L	5.715	21	469	0%	10.94	5.715	21	469	0%	0%	0%
5S	5.07	16	538	0%	0.27	5.111	17	515	0.81%	0%	0%
5M	4.688	19	476	0%	0.43	4.688	19	476	0%	0%	0%
5L	4.568	17	488	0%	2.09	4.601	17	438	0.72%	0%	0%

Tableau 6.21 – Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - BW

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Comp.	Dep.	Dist.	GAP	temps(s)	Comp.	Dep .	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.
1S	6.071	15	484	0%	0.24	6.071	15	484	0%	0%	0%
1M	5.849	15	470	0%	0.17	5.849	15	470	0%	0%	0%
1L	5.849	15	459	0%	0.37	5.849	15	470	0%	0%	2.4%
2S	5.822	20	502	0%	0.08	5.822	20	502	0%	0%	0%
2M	5.428	20	471	0%	0.60	5.428	20	475	0%	0%	0.85%
2L	5.302	20	431	0%	2.82	5.405	21	420	1.94%	-	-
3S	6.624	20	449	0%	0.09	7.022	19	456	6.01%	-	-
3M	6.375	19	436	0%	0.27	6.416	17	454	0.64%	-	-
3L	6.375	19	375	0%	0.23	6.375	19	388	0%	0%	3.47%
4M	6.912	17	500	0%	0.23	7.327	18	472	6.00%	-	-
4L	6.847	19	472	0%	7.31	6.995	19	484	2.16%	-	-
5S	5.245	15	472	0%	0.16	5.277	16	454	0.61%	-	-
5M	5.022	15	478	0%	0.23	5.045	17	444	0.46%	-	-
5L	4.922	17	468	0%	0.72	4.954	17	450	0.65%	-	-

Tableau 6.22 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Comp.	Dep.	Dist.	GAP	temps(s)	Comp.	Dep .	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.
1S	6.071	15	484	0%	0.24	6.071	15	484	0%	0%	0%
1M	5.849	15	470	0%	0.17	5.849	15	470	0%	0%	0%
1L	5.849	15	459	0%	0.37	5.849	15	459	0%	0%	0%
2S	5.822	20	502	0%	0.08	5.822	20	502	0%	0%	0%
2M	5.428	20	471	0%	0.60	5.428	20	475	0%	0%	0.85
2L	5.302	20	431	0%	2.82	5.405	21	420	1.94%	-	-
3S	6.624	20	449	0%	0.09	7.022	19	456	6.01%	-	-
3M	6.375	19	436	0%	0.27	6.416	17	454	0.64%	-	-
3L	6.375	19	375	0%	0.23	6.375	19	388	0%	0%	3.47
4M	6.912	17	500	0%	0.23	7.327	17	472	6.0%	-	-
4L	6.847	19	472	0%	7.31	6.995	19	484	2.16%	-	-
5S	5.245	15	472	0%	0.16	5.277	16	454	0.61%	-	-
5M	5.022	15	478	0%	0.23	5.045	17	444	0.46%	-	-
5L	4.922	17	468	0%	0.72	4.954	17	450	0.65%	-	-

Tableau 6.23 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Comp.	Dep.	Dist.	GAP	temps(s)	Comp.	Dep .	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.
1S	7.791	15	539	0%	0.2	7.791	15	539	0%	0%	0%
1M	7.307	15	542	0%	0.24	7.307	15	542	0%	0%	0%
1L	7.307	15	540	0%	2.33	7.307	15	542	0%	0%	0.37%
2M	6.018	17	516	0%	3.5	6.018	17	516	0%	0%	0%
2L	5.731	20	479	0%	11.56	5.834	21	501	1.80%	-	-
3S	8.753	20	464	0%	0.62	9.044	16	469	3.32%	-	-
3M	7.288	22	493	0%	0.68	7.737	18	478	6.16%	-	-
3L	7.288	22	479	0%	3.26	7.591	16	474	4.16%	-	-
5S	5.912	17	481	0%	0.14	6.009	19	485	1.64%	-	-
5M	5.546	17	526	0%	0.21	5.62	19	487	1.33%	-	-
5L	5.402	17	496	0%	1.05	5.435	19	459	0.61%	-	-

Tableau 6.24 – Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Comp.	Dep.	Dist.	GAP	temps(s)	Comp.	Dep .	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.
1S	7.791	15	539	0%	0.2	7.791	15	539	0%	0%	0%
1M	7.307	15	542	0%	0.24	7.307	15	542	0%	0%	0%
1L	7.307	15	540	0%	2.33	7.307	15	542	0%	0%	0.37%
2M	6.018	17	516	0%	3.5	6.018	17	516	0%	0%	0%
2L	5.731	20	479	0%	11.56	5.834	21	501	1.80%	-	-
3S	8.753	20	464	0%	0.62	9.044	16	469	3.32%	-	-
3M	7.288	22	493	0%	0.68	7.737	18	478	6.16%	-	-
3L	7.288	22	479	0%	3.26	7.591	16	474	4.16%	-	-
5S	5.912	17	481	0%	0.14	6.009	19	485	1.64%	-	-
5M	5.546	17	526	0%	0.21	5.62	19	487	1.33%	-	-
5L	5.402	17	496	0%	1.05	5.435	19	459	0.61%	-	-

Tableau 6.25 – Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dep	Comp	Dist	GAP	temps	Dep	Comp	Dist	Dep	Comp	Dist
1S	13	5.547	474	3,83%	3600	13.0	5.547	474	0%	0%	0%
1M	13	5.142	450	3,61%	3600	13.0	5.142	450	0%	0%	0%
1L	13	5.142	449	4,19%	3600	13.0	5.142	450	0%	0%	0.22%
2S	13	4.399	538	0%	0.09	13.0	4.399	538	0%	0%	0%
2M	13	4.399	514	0%	0.25	13.0	4.623	450	0%	5.1%	-
2L	13	4.399	444	0%	0.8	13.0	4.399	466	0%	0%	4.95%
3S	14	5.171	451	0%	1329.45	14.0	5.171	451	0%	0%	0%
3M	14	5.115	428	1,39%	3600	14.0	5.157	450	0%	0.80%	-
3L	14	5.115	411	2,25%	3600	14.0	5.167	419	0%	1.00%	-
4S	14	5.973	502	0%	2525.78	14.0	6.609	506	0%	10.6%	-
4M	14	5.893	552	4,13%	3600	14.0	6.388	489	0%	8.4%	-
4L	14	5.69	519	4,92%	3600	14.0	5.693	536	0%	1.00%	-
5S	13	4.603	484	0%	647.352	13.0	4.779	424	0%	3.8%	-
5M	13	4.367	429	0,56%	3600	13.0	4.367	429	0%	0%	0%
5L	13	4.285	409	0,75%	3600	13.0	4.285	409	0%	0%	0%

Tableau 6.26 – Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dep	Comp	Dist	GAP	temps	Dep	Comp	Dist	Dep	Comp	Dist
1S	13	5.547	474	3,83%	3600	13	5.547	474	0%	0%	0%
1M	13	5.142	450	3,61%	3600	13	5.142	450	0%	0%	0%
1L	13	5.142	449	4,19%	3600	13	5.142	450	0%	0%	0.2%
2S	13	4.399	538	0%	0.09	13	5	542	0%	13.7%	-
2M	13	4.399	514	0%	0.25	13	4.399	514	0%	0%	0%
2L	13	4.399	444	0%	0.8	13	4.399	466	0%	0%	5.0%
3S	14	5.171	451	0%	1329.45	14	5.171	451	0%	0%	0%
3M	14	5.115	428	1,39%	3600	14	5.115	433	0%	0%	1.2%
3L	14	5.115	411	2,25%	3600	14	5.171	439	0%	1.1%	-
4S	14	5.973	502	0%	2525.78	14	6.507	511	0%	0.89%	-
4M	14	5.893	552	4,13%	3600	14	6.139	544	0%	0.42%	-
4L	14	5.69	519	4,92%	3600	14	5.815	505	0%	0.22%	-
5S	13	4.603	484	0%	647.35	13	4.897	404	0%	0.64%	-
5M	13	4.367	429	0,56%	3600	13	4.367	429	0%	0%	0%
5L	13	4.285	409	0,75%	3600	13	4.301	455	0%	0.4%	-

Tableau 6.27 – Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					MW			GAP		
	Dep	Comp	Dist	GAP	temps	Dep	Comp	Dist	Dep	Comp	Dist
1S	13	6.595	514	0%	94.82	13	6.758	517	0%	2.47%	-
1M	13	6.373	521	0%	2.88	13	6.373	521	0%	0%	0%
1L	13	6.373	483	0%	5.92	13	6.448	450	0%	1.18%	-
2S	14	6.102	523	0%	0.97	14	6.331	571	0%	3.75%	-
2M	14	4.901	519	0%	6.00	14	5.062	590	0%	3.29%	-
2L	14	4.855	448	0%	5.21	14	4.901	466	0%	0.95%	-
3S	15	6.801	500	0%	1873.37	15	7.532	553	0%	10.75%	-
3M	15	5.795	493	1.8%	3600	15	6.602	503	0%	13.93%	-
3L	15	5.795	472	2.6%	3600	15	6.168	477	0%	6.44%	-
5S	15	5.214	504	0%	2852.28	15	5.383	473	0%	3.24%	-
5M	15	4.794	495	2%	3600	15	4.888	453	0%	1.96%	-
5L	15	4.667	464	1%	3600	15	4.677	459	0%	0.21%	-

Tableau 6.28 – Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					MW			GAP		
	Dep	Comp	Dist	GAP	temps	Dep	Comp	Dist	Dep	Comp	Dist
1S	13	6.595	514	0%	94.82	13	6.796	510	0%	3.05%	-
1M	13	6.373	521	0%	2.88	13	6.548	472	0%	2.75%	-
1L	13	6.373	483	0%	5.92	13	6.373	510	0%	0%	5.59%
2S	14	6.102	523	0%	0.97	14	6.291	546	0%	3.10%	-
2M	14	4.901	519	0%	6.00	14	4.97	553	0%	1.41%	-
2L	14	4.855	448	0%	5.21	14	4.888	524	0%	0.68%	-
3S	15	6.801	500	0%	1873.37	15	6.917	529	0%	1.71%	-
3M	15	5.795	493	1.8%	3600	15	6.741	471	0%	16.32%	-
3L	15	5.795	472	2.6%	3600	15	5.795	493	0%	0%	4.45%
5S	15	5.214	504	0%	2852.28	15	5.359	528	0%	2.78%	-
5M	15	4.794	495	2%	3600	15	4.879	486	0%	1.77%	-
5L	15	4.667	464	1%	3600	15	4.677	459	0%	0.21%	-

Tableau 6.29 – Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dep	Comp	Dist	GAP	temps	Dep	Comp	Dist	Dep	Comp	Dist
1S	13	6.595	514	0%	94.82	13	6.758	517	0%	2.47%	-
1M	13	6.373	521	0%	2.88	13	6.373	521	0%	0%	0%
1L	13	6.373	483	0%	5.92	13	6.448	450	0%	1.18%	-
2S	14	6.102	523	0%	0.97	14	6.331	571	0%	3.75%	-
2M	14	4.901	519	0%	6.0	14	5.062	590	0%	3.29%	-
2L	14	4.855	448	0%	5.21	14	4.901	466	0%	0.95%	-
3S	15	6.801	500	0%	1873	15	7.532	553	0%	10.75%	-
3M	15	5.795	493	1,75%	3600	15	6.602	503	0%	13.93%	-
3L	15	5.795	472	2,59%	3600	15	6.168	477	0%	6.44%	-
5S	15	5.214	504	0%	2852.28	15	5.383	473	0%	3.24%	-
5M	15	4.794	495	2,00%	3600	15	4.888	453	0%	1.96%	-
5L	15	4.667	464	1,02%	3600	15	4.677	459	0%	0.21%	-

Tableau 6.30 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dep	Comp	Dist	GAP	temps	Dep	Comp	Dist	Dep	Comp	Dist
1S	13	6.595	514	0%	94.82	13	6.796	510	0%	3.05%	-
1M	13	6.373	521	0%	2.88	13	6.548	472	0%	2.75%	-
1L	13	6.373	483	0%	5.92	13	6.373	510	0%	0%	5.59%
2S	14	6.102	523	0%	0.97	14	6.291	546	0%	3.1%	-
2M	14	4.901	519	0%	6.0	14	4.97	553	0%	1.41%	-
2L	14	4.855	448	0%	5.21	14	4.888	524	0%	0.68%	-
3S	15	6.801	500	0%	1873	15	6.917	529	0%	1.71%	-
3M	15	5.795	493	1,75%	3600	15	6.741	471	0%	16.32%	-
3L	15	5.795	472	2,59%	3600	15	5.795	493	0%	0%	4.44%
5S	15	5.214	504	0%	2852.28	15	5.359	528	0%	2.78%	-
5M	15	4.794	495	2,00%	3600	15	4.879	486	0%	1.77%	-
5L	15	4.667	464	1,02%	3600	15	4.677	459	0%	0.21%	-

Tableau 6.31 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dep	Comp	Dist	GAP	temps	Dep	Comp	Dist	Dep	Comp	Dist
1 <i>S</i>	13	7.842	553	0%	1.61	13	7.842	553	0%	0%	0%
1 <i>M</i>	13	7.701	561	0%	1.95	13	7.701	574	0%	0%	2.32%
1 <i>L</i>	13	7.701	517	0%	5.15	13	7.701	546	0%	0%	5.61%
2 <i>M</i>	14	8.2	496	0%	1.67	14	8.2	496	0%	0%	0%
2 <i>L</i>	14	7.905	495	0%	1.91	14	7.905	495	0%	0%	0%
3 <i>S</i>	15	10.191	522	0%	0.72	15	10.618	474	0%	4.19%	-
3 <i>M</i>	15	7.766	473	0%	147.34	15	7.805	476	0%	0.5%	-
3 <i>L</i>	15	7.754	448	0%	747.30	15	7.766	474	0%	0.15%	-
5 <i>S</i>	15	6.208	497	0%	2.63	15	6.208	497	0%	0%	0%
5 <i>M</i>	15	5.777	527	0%	30.79	15	5.777	527	0%	0%	0%
5 <i>L</i>	15	5.68	488	0%	210.91	15	5.887	426	0%	3.64%	-

Tableau 6.32 – Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dep	Comp	Dist	GAP	temps	Dep	Comp	Dist	Dep	Comp	Dist
1 <i>S</i>	13	7.842	553	0%	1.61	13	7.842	553	0%	0%	0%
1 <i>M</i>	13	7.701	561	0%	1.95	13	7.701	574	0%	0%	2.32%
1 <i>L</i>	13	7.701	517	0%	5.15	13	7.701	546	0%	0%	5.61%
2 <i>M</i>	14	8.2	496	0%	1.67	14	8.2	500	0%	0%	0.81%
2 <i>L</i>	14	7.905	495	0%	1.91	14	7.905	495	0%	0%	0%
3 <i>S</i>	15	10.191	522	0%	0.72	15	10.224	499	0%	0.32%	-
3 <i>M</i>	15	7.766	473	0%	147.34	15	7.805	476	0%	0.5%	-
3 <i>L</i>	15	7.754	448	0%	747.30	15	7.766	474	0%	0.15%	-
5 <i>S</i>	15	6.208	497	0%	2.63	15	6.208	497	0%	0%	0%
5 <i>M</i>	15	5.777	527	0%	30.79	15	5.777	527	0%	0%	0%
5 <i>L</i>	15	5.68	488	0%	210.91	15	5.71	485	0%	0.53%	-

Tableau 6.33 – Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					BW			GAP		
	Dist.	Dep.	Comp.	GAP	temps	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.
1S	274	15	8.398	0%	0.94	274	15	8.398	0%	0%	0%
1M	274	15	8.398	0%	2.74	274	15	8.398	0%	0%	0%
1L	262	15	8.837	0%	4.54	262	15	8.837	0%	0%	0%
2S	346	20	8.042	0%	0.13	346	20	8.042	0%	0%	0%
2M	290	14	8.301	0%	2.03	290	14	8.676	0%	0%	4.52%
2L	277	14	8.301	0%	9.18	277	14	8.301	0%	0%	0%
3S	265	19	967	0%	0.39	265	19	9.605	0%	0%	5.93%
3M	254	15	8.98	0%	2.81	255	15	9.592	0.39%	-	-
3L	251	15	8.98	0%	4.94	252	15	8.926	0.4%	-	-
4S	373	17	8.34	0%	5.85	385	16	8.454	3.22%	-	-
4M	335	16	8.427	0%	4.51	349	15	8.714	4.18%	-	-
4L	290	18	7.538	0%	43.16	305	15	8.66	5.17%	-	-
5S	313	14	7.867	0%	0.87	313	14	7.899	0%	0%	0.41%
5M	281	13	6.809	0%	12	281	13	8.452	0%	0%	24.13%
5L	266	14	6.966	0%	2.39	266	14	6.966	0%	0%	0%

Tableau 6.34 – Résultats - 1 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - MW

	PLNE					BW			GAP		
	Dist.	Dep.	Comp.	GAP	temps	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.
1S	274	15	8.398	0%	0.94	274	15	8.398	0%	0%	0%
1M	274	15	8.398	0%	2.74	274	15	8.73	0%	0%	3.95
1L	262	15	8.837	0%	4.54	262	15	8.837	0%	0%	0%
2S	346	20	8.042	0%	0.13	346	20	8.042	0%	0%	0%
2M	290	14	8.301	0%	2.03	290	14	8.301	0%	0%	0%
2L	277	14	8.301	0%	9.18	277	14	8.301	0%	0%	0%
3S	265	19	9.067	0%	0.39	265	19	9.067	0%	0%	0%
3M	254	15	8.98	0%	2.81	255	15	9.592	0.39%	-	-
3L	251	15	8.98	0%	4.94	252	15	9.592	0.4%	-	-
4S	373	17	8.34	0%	5.85	385	16	8.758	3.22%	-	-
4M	335	16	8.427	0%	4.51	349	15	8.541	4.18%	-	-
4L	290	18	7.538	0%	43.16	305	15	9.183	5.17%	-	-
5S	313	14	7.867	0%	0.87	313	14	8.509	0%	0%	8.16
5M	281	13	6.809	0%	1.02	281	13	7.418	0%	0%	8.94
5L	266	14	6.966	0%	2.39	266	14	6.966	0%	0%	0%

Tableau 6.35 – Résultats - 1 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - MW

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dist.	Dep.	Comp.	GAP	temps	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.
1S	317	13	10.184	0%	1.0	320	13	10.710	0.95%	-	-
1M	316	13	10.438	0%	5.05	316	13	10.482	0%	0%	0.42%
1L	300	16	8.87	0%	5.75	300	16	9.583	0%	0%	8.04%
2S	440	16	9.037	0%	0.32	440	16	10.039	0%	0%	11.09%
2M	341	18	8.239	0%	8.2	341	18	9.318	0%	0%	13.1%
2L	313	18	8.183	0%	13.95	313	18	8.183	0%	0%	0%
3S	336	16	9.411	0%	1.06	352	16	10.033	4.76%	-	-
3M	315	15	10.719	0%	19.0	322	15	10.282	2.22%	-	-
3L	309	16	10.034	0%	59.91	310	17	11.423	0.32%	-	-
5S	356	15	7.985	0%	3.28	356	17	8.831	0%	13.33%	-
5M	313	17	7.749	0%	0.86	313	17	8.452	0%	0%	9.07%
5L	301	17	7.061	0%	5.49	301	17	7.061	0%	0%	0%

Tableau 6.36 – Résultats - 1 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dist.	Dep.	Comp.	GAP	temps	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.
1S	317	13	10.184	0%	1.0	320	13	11.096	0.95%	-	-
1M	316	13	10.438	0%	5.05	316	13	10.881	0%	0%	4.24%
1L	300	16	8.87	0%	5.75	300	16	8.87	0%	0%	0%
2S	440	16	9.037	0%	0.32	440	16	10.574	0%	0%	17.01%
2M	341	18	8.239	0%	8.2	341	18	8.477	0%	0%	2.89%
2L	313	18	8.183	0%	13.95	313	18	8.45	0%	0%	3.26%
3S	336	16	9.411	0%	1.06	344	17	10.242	2.38%	-	-
3M	315	15	10.719	0%	19.0	316	16	10.87	0.32%	-	-
3L	309	16	10.034	0%	59.91	310	17	10.668	0.32%	-	-
5S	356	15	7.985	0%	3.28	356	15	8.032	0%	0%	0.59%
5M	313	17	7.749	0%	0.86	313	17	8.379	0%	0%	8.13%
5L	301	17	7.061	0%	5.49	301	17	7.061	0%	0%	0%

Tableau 6.37 – Résultats - 1 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dist.	Dep.	Comp.	GAP	temps	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.
1S	309	17	9.228	0%	0.25	309	17	9.228	0%	0%	0%
1M	302	17	9.228	0%	0.7	309	17	9.177	2.32%	-	-
1L	287	17	9.228	0%	1.04	287	17	9.228	0%	0%	0%
2S	415	18	10.202	0%	0.09	415	18	10.202	0%	0%	0%
2M	329	16	8.876	0%	0.53	329	16	8.876	0%	0%	0%
2L	324	16	8.876	0%	4.89	324	16	8.876	0%	0%	0%
3S	317	18	8.583	0%	0.12	325	18	9.168	2.52%	-	-
3M	291	19	9.581	0%	0.17	294	18	9.272	1.03%	-	-
3L	286	19	9.101	0%	0.83	288	16	9.479	0.7%	-	-
4M	348	16	10.574	0%	0.33	379	16	10.024	8.91%	-	-
4L	323	16	9.159	0%	9.88	341	16	10.234	5.57%	-	-
5S	363	18	7.576	0%	0.67	363	18	7.576	0%	0%	0%
5M	325	16	7.247	0%	0.58	325	16	7.247	0%	0%	0%
5L	304	16	7.679	0%	0.66	309	17	7.876	1.64%	-	-

Tableau 6.38 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dist.	Dep.	Comp.	GAP	temps	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.
1S	309	17	9.228	0	0.25	309	17	9.228	0%	0%	0%
1M	302	17	9.228	0	0.7	309	17	9.177	2.32%	-	-
1L	287	17	9.228	0	1.04	287	17	9.228	0%	0%	0%
2S	415	18	10.202	0	0.09	415	18	10.202	0%	0%	0%
2M	329	16	8.876	0	0.53	329	16	8.876	0%	0%	0%
2L	324	16	8.876	0	4.89	324	16	8.876	0%	0%	0%
3S	317	18	8.583	0	0.12	325	18	8.916	2.52%	-	-
3M	291	19	9.581	0	0.17	294	18	9.272	1.03%	-	-
3L	286	19	9.101	0	0.83	288	16	9.546	0.7%	-	-
4M	348	16	10.574	0	0.33	379	16	9.395	8.91%	-	-
4L	323	16	9.159	0	9.88	341	16	10.234	5.57%	-	-
5S	363	18	7.576	0	0.67	363	18	7.576	0%	0%	0%
5M	325	16	7.247	0	0.58	325	16	7.247	0%	0%	0%
5L	304	16	7.679	0	0.66	309	17	7.876	1.64%	-	-

Tableau 6.39 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dist.	Dep.	Comp.	GAP	temps	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.
1S	381	15	12.04	0%	0.5	385	14	12.285	1.05%	-	-
1M	359	16	11.145	0%	0.89	359	16	12.175	0%	0%	9.24%
1L	345	16	9.807	0%	1.96	346	16	10.399	0.29%	-	-
2M	402	16	10.526	0%	7.33	407	17	9.923	1.24%	-	-
2L	367	18	9.796	0%	12.92	372	18	9.471	1.36%	-	-
3S	437	18	10.565	0%	0.95	442	16	10.232	1.14%	-	-
3M	368	16	9.783	0%	4.31	379	16	9.466	2.99%	-	-
3L	354	17	9.886	0%	12.13	360	16	9.876	1.69%	-	-
5S	415	16	7.572	0%	0.36	419	18	7.644	0.96%	-	-
5M	377	18	8.645	0%	1.46	381	18	7.61	1.06%	-	-
5L	334	17	8.369	0%	0.49	341	17	8.455	2.1%	-	-

Tableau 6.40 – Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dist.	Dep.	Comp.	GAP	temps	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.
1S	381	15	12.04	0%	0.5	385	14	12.008	1.05%	-	-
1M	359	16	11.145	0%	0.89	359	16	11.373	0%	0%	2.05%
1L	345	16	9.807	0%	1.96	346	16	10.399	0.29%	-	-
2M	402	16	10.526	0%	7.33	407	17	9.923	1.24%	-	-
2L	367	18	9.796	0%	12.92	372	16	8.966	1.36%	-	-
3S	437	18	10.565	0%	0.95	442	16	10.232	1.14%	-	-
3M	368	16	9.783	0%	4.31	379	16	9.134	2.99%	-	-
3L	354	17	9.886	0%	12.13	360	16	9.158	1.69%	-	-
5S	415	16	7.572	0%	0.36	419	18	7.644	0.96%	-	-
5M	377	18	8.645	0%	1.46	381	18	7.61	1.06%	-	-
5L	334	17	8.369	0%	0.49	341	17	8.455	2.1%	-	-

Tableau 6.41 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Comp.	Dist.	Dep.	GAP	temps	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.
1S	4.962	492	16	0%	0.46	4.962	492	16	0%	0%	0%
1M	4.621	482	17	0%	0.4	4.621	482	17	0%	0%	0%
1L	4.621	481	17	0%	0.81	4.621	482	17	0%	0.21%	-
2S	4.018	511	20	0%	0.12	4.018	511	20	0%	0%	0%
2M	3.915	479	21	0%	0.57	3.915	479	21	0%	0%	0%
2L	3.834	440	24	0%	0.96	3.847	738	20	0.34%	-	-
3S	5.007	480	15	0%	0.08	5.007	480	15	0%	0%	0%
3M	4.884	429	17	0%	0.36	4.884	434	17	0%	1.17%	-
3L	4.884	404	17	0%	0.41	4.884	409	17	0%	1.24%	-
4S	5.489	484	19	0%	0.22	5.489	484	19	0%	0%	0%
4M	5.333	512	20	0%	2.46	5.489	484	19	2.93%	-	-
4L	5.2	454	22	0%	103.52	5.418	438	21	4.19%	-	-
5S	4.484	478	17	0%	0.18	4.484	478	17	0%	0%	0%
5M	4.164	423	17	0%	0.27	4.164	423	17	0%	0%	0%
5L	4.088	413	17	0%	0.88	4.12	429	15	0.78%	-	-

Tableau 6.42 – Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Comp.	Dist.	Dep.	GAP	temps	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.
1S	4.962	492	16	0%	0.46	4.962	492	16	0%	0%	0%
1M	4.621	482	17	0%	0.4	4.621	482	17	0%	0%	0%
1L	4.621	481	17	0%	0.81	4.621	482	17	0%	0.21%	-
2S	4.018	511	20	0%	0.12	4.018	511	20	0%	0%	0%
2M	3.915	479	21	0%	0.57	3.915	479	21	0%	0%	0%
2L	3.834	440	24	0%	0.96	3.847	438	20	0.34%	-	-
3S	5.007	480	15	0%	0.08	5.007	480	15	0%	0%	0%
3M	4.884	429	17	0%	0.36	4.884	434	17	0%	1.17%	-
3L	4.884	404	17	0%	0.41	4.884	409	17	0%	1.24%	-
4S	5.489	484	19	0%	0.22	5.489	484	19	0%	0%	0%
4M	5.333	512	20	0%	2.46	5.489	484	19	2.93%	-	-
4L	5.2	454	22	0%	103.52	5.418	438	21	4.19%	-	-
5S	4.484	478	17	0%	0.18	4.484	478	17	0%	0%	0%
5M	4.164	423	17	0%	0.27	4.164	423	17	0%	0%	0%
5L	4.088	413	17	0%	0.88	4.12	429	15	0.78%	-	-

Tableau 6.43 – Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Comp.	Dist.	Dep.	GAP	temps	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.
1S	6.005	545	16	0%	0.16	6.005	545	16	0%	0%	0%
1M	5.747	531	19	0%	0.31	5.747	531	19	0%	0%	0%
1L	5.747	530	19	0%	0.94	5.747	531	19	0%	0.19%	-
2S	5.141	553	21	0%	0.2	5.141	553	21	0%	0%	0%
2M	4.366	543	23	0%	1.1	4.366	543	23	0%	0%	0%
2L	4.263	496	24	0%	25.48	4.366	473	23	2.42%	-	-
3S	6.335	495	18	0%	0.45	6.776	536	17	6.96%	-	-
3M	5.732	496	17	0%	0.42	5.773	469	17	0.72%	-	-
3L	5.715	469	21	0%	2.25	5.715	469	21	0%	0%	0%
5S	5.07	538	16	0%	0.24	5.111	515	16	0.81%	-	-
5M	4.688	476	19	0%	0.4	4.688	476	19	0%	0%	0%
5L	4.568	462	17	0%	0.85	4.601	438	17	0.72%	-	-

Tableau 6.44 – Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Comp.	Dist.	Dep.	GAP	temps	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.
1S	6.005	545	16	0%	0.16	6.005	545	16	0%	0%	0%
1M	5.747	531	19	0%	0.31	5.747	531	19	0%	0%	0%
1L	5.747	530	19	0%	0.94	5.747	531	19	0%	0.19%	-
2S	5.141	553	21	0%	0.2	5.141	553	21	0%	0%	0%
2M	4.366	543	23	0%	1.1	4.366	543	23	0%	0%	0%
2L	4.263	496	24	0%	25.48	4.366	473	23	2.42%	-	-
3S	6.335	495	18	0%	0.45	6.623	476	17	4.55%	-	-
3M	5.732	496	17	0%	0.42	5.74	521	17	0.14%	-	-
3L	5.715	469	21	0%	2.25	5.715	469	21	0%	0%	0%
5S	5.07	538	16	0%	0.24	5.111	515	17	0.81%	-	-
5M	4.688	476	19	0%	0.4	4.688	476	19	0%	0%	0%
5L	4.568	462	17	0%	0.85	4.601	438	17	0.72%	-	-

Tableau 6.45 – Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Comp.	Dist.	Dep.	GAP	temps	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.
1S	6.071	484	15	0%	0.37	6.071	484	15	0%	0%	0%
1M	5.849	470	15	0%	0.15	5.849	470	15	0%	0%	0%
1L	5.849	457	15	0%	0.24	5.849	459	15	0%	0.44%	-
2S	5.822	502	20	0%	0.13	5.822	502	20	0%	0%	0%
2M	5.428	470	20	0%	0.45	5.428	475	20	0%	1.06%	-
2L	5.302	424	20	0%	1.23	5.405	420	21	1.94%	-	-
3S	6.624	449	20	0%	0.1	7.022	456	19	6.01%	-	-
3M	6.375	417	19	0%	0.24	6.416	454	17	0.64%	-	-
3L	6.375	378	19	0%	0.28	6.375	388	19	0%	2.65%	-
4M	6.912	499	17	0%	0.26	7.327	472	17	6.0%	-	-
4L	6.847	468	19	0%	12.03	6.995	484	19	2.16%	-	-
5S	5.245	465	15	0%	0.15	5.277	454	16	0.61%	-	-
5M	5.022	478	15	0%	0.26	5.045	444	17	0.46%	-	-
5L	4.922	448	17	0%	0.83	4.954	450	17	0.65%	-	-

Tableau 6.46 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Comp.	Dist.	Dep.	GAP	temps	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.
1S	6.071	484	15	0%	0.37	6.071	484	15	0%	0%	0%
1M	5.849	470	15	0%	0.15	5.849	470	15	0%	0%	0%
1L	5.849	457	15	0%	0.24	5.849	459	15	0%	0.44%	-
2S	5.822	502	20	0%	0.13	5.822	502	20	0%	0%	0%
2M	5.428	470	20	0%	0.45	5.428	475	20	0%	1.06%	-
2L	5.302	424	20	0%	1.23	5.405	420	21	1.94%	-	-
3S	6.624	449	20	0%	0.1	7.022	456	19	6.01%	-	-
3M	6.375	417	19	0%	0.24	6.416	454	17	0.64%	-	-
3L	6.375	378	19	0%	0.28	6.375	388	19	0%	2.65%	-
4M	6.912	499	17	0%	0.26	7.327	472	17	6.0%	-	-
4L	6.847	468	19	0%	12.03	6.995	484	19	2.16%	-	-
5S	5.245	465	15	0%	0.15	5.277	454	16	0.61%	-	-
5M	5.022	478	15	0%	0.26	5.045	444	17	0.46%	-	-
5L	4.922	448	17	0%	0.83	4.954	450	17	0.65%	-	-

Tableau 6.47 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Comp.	Dist.	Dep.	GAP	temps	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.
1S	7.791	539	15	0%	0.17	7.791	539	15	0%	0%	0%
1M	7.307	542	15	0%	0.17	7.307	542	15	0%	0%	0%
1L	7.307	540	15	0%	1.33	7.307	542	15	0%	0.37%	-
2S	6.018	516	17	0%	1.87	6.018	516	17	0%	0%	0%
2M	5.731	479	20	0%	6.59	5.834	501	21	1.8%	-	-
3S	8.753	464	20	0%	0.36	9.044	469	16	3.32%	-	-
3M	7.288	493	22	0%	0.63	7.737	478	18	6.16%	-	-
3L	7.288	479	22	0%	1.15	7.591	474	16	4.16%	-	-
5S	5.912	481	17	0%	0.15	6.009	485	19	1.64%	-	-
5M	5.546	526	17	0%	0.21	5.62	487	19	1.33%	-	-
5L	5.402	483	17	0%	1.06	5.435	459	19	0.61%	-	-

Tableau 6.48 – Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Comp.	Dist.	Dep.	GAP	temps	Comp.	Dist.	Dep.	Comp.	Dist.	Dep.
1S	7.791	539	15	0%	0.17	7.791	539	15	0%	0%	0%
1M	7.307	542	15	0%	0.17	7.307	542	15	0%	0%	0%
1L	7.307	540	15	0%	1.33	7.307	542	15	0%	0.37%	-
2S	6.018	516	17	0%	1.87	6.018	516	17	0%	0%	0%
2M	5.731	479	20	0%	6.59	5.834	501	21	1.8%	-	-
3S	8.753	464	20	0%	0.36	9.139	469	17	4.41%	-	-
3M	7.288	493	22	0%	0.63	7.737	478	18	6.16%	-	-
3L	7.288	479	22	0%	1.15	7.591	474	16	4.16%	-	-
5S	5.912	481	17	0%	0.15	6.009	485	19	1.64%	-	-
5M	5.546	526	17	0%	0.21	5.62	487	19	1.33%	-	-
5L	5.402	483	17	0%	1.06	5.435	459	19	0.61%	-	-

Tableau 6.49 – Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dep.	Dist.	Comp.	GAP	temps	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.
1S	13	282	9.482	4,97%	3600	13	282	11.847	0%	0%	24.94%
1M	13	282	8.548	5,50%	3600	13	282	9.482	0%	0%	10.93%
1L	13	265	7.78	5,53%	3600	13	265	9.724	0%	0%	24.99%
2S	13	374	7.741	0%	0.73	13	374	10.363	0%	0%	33.87%
2M	13	320	7.575	0%	70.63	13	322	8.578	0%	0.63%	-
2L	13	293	8.397	0%	106.54	13	293	9.335	0%	0%	11.17%
3S	14	278	8.203	2,30%	3600.0	14	279	8.556	0%	0.36%	-
3M	14	256	9.326	3,36%	3600.0	14	261	9.885	0%	1.95%	-
3L	14	253	9.326	3,42%	3600.0	14	265	9.568	0%	4.74%	-
4S	14	389	8.83	3,90%	3600.0	14	389	10.127	0%	0%	14.69%
4M	14	346	8.848	5,15%	3600.0	14	370	10.132	0%	6.94%	-
4L	14	315	9.344	5,43%	3600.0	14	318	10.156	0%	0.95%	-
5S	13	314	6.78	0%	415.86	13	314	6.78	0%	0%	0%
5M	13	281	6.809	0%	1515.25	13	286	7.476	0%	1.78%	-
5L	13	268	6.741	1,61%	3600.0	13	271	6.916	0%	1.12%	-

Tableau 6.50 – Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dep.	Dist.	Comp.	GAP	temps	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.
1S	13	282	9.482	4,97%	3600	13	282	9.013	0%	0%	-4.95%
1M	13	282	8.548	5,50%	3600	13	282	8.761	0%	0%	2.49%
1L	13	265	7.78	5,53%	3600	13	265	7.78	0%	0%	0%
2S	13	374	7.741	0%	0.73	13	376	10.249	0%	0.53%	-
2M	13	320	7.575	0%	70.63	13	322	7.9	0%	0.63%	-
2L	13	293	8.397	0%	106.54	13	296	8.401	0%	1.02%	-
3S	14	278	8.203	2,30%	3600	14	279	8.556	0%	0.36%	-
3M	14	256	9.326	3,36%	3600	14	268	9.232	0%	4.69%	-
3L	14	253	9.326	3,42%	3600	14	264	9.007	0%	4.35%	-
4S	14	389	8.83	3,90%	3600	14	399	9.67	0%	2.57%	-
4M	14	346	8.848	5,15%	3600	14	359	11.435	0%	3.76%	-
4L	14	315	9.344	5,43%	3600	14	317	10.2	0%	0.63%	-
5S	13	314	6.78	0%	415.86	13	314	7.685	0%	0%	13.35%
5M	13	281	6.809	0%	1515.25	13	282	8.018	0%	0.36%	-
5L	13	268	6.741	1,61%	3600	13	268	7.243	0%	0%	7.45%

Tableau 6.51 – Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dep.	Dist.	Comp.	GAP	temps	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.
1S	12	345	9.663	0%	0.82	12	345	9.663	0%	0%	0%
1M	12	344	9.663	0%	4.18	12	344	9.663	0%	0%	0%
1L	12	338	9.76	0%	18.31	12	338	10.137	0%	0%	3.86%
2S	13	438	9.457	0%	0.11	13	438	9.457	0%	0%	0%
2M	13	372	9.396	0%	0.63	13	372	9.396	0%	0%	0%
2L	13	367	9.396	0%	6.97	13	367	9.396	0%	0%	0%
3S	14	357	9.093	0%	3.74	14	357	9.093	0%	0%	0%
3M	14	307	8.58	0%	544.58	14	309	8.746	0%	0.65%	-
3L	14	301	8.27	0%	2246.1	14	301	8.27	0%	0%	0%
4M	14	365	9.867	0%	220.27	14	406	9.956	0%	11.23%	-
4L	14	355	10.051	1,73%	3600	14	365	9.532	0%	2.82%	-
5S	13	404	6.556	0%	2.43	13	416	7.242	0%	2.97%	-
5M	13	348	6.557	0%	2.43	13	348	6.557	0%	0%	0%
5L	13	333	7.418	0%	5.49	13	339	6.803	0%	1.8%	-

Tableau 6.52 – Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dep.	Dist.	Comp.	GAP	temps	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.
1S	12	345	9.663	0%	0.82	12	345	9.663	0%	0%	0%
1M	12	344	9.663	0%	4.18	12	344	10.856	0%	0%	12.35%
1L	12	338	9.76	0%	18.31	12	338	10.39	0%	0%	6.45%
2S	13	438	9.457	0%	0.11	13	438	9.457	0%	0%	0%
2M	13	372	9.396	0%	0.63	13	372	9.396	0%	0%	0%
2L	13	367	9.396	0%	6.97	13	367	9.396	0%	0%	0%
3S	14	357	9.093	0%	3.74	14	357	9.093	0%	0%	0%
3M	14	307	8.58	0%	544.58	14	309	9.32	0%	0.65%	-
3L	14	301	8.27	0%	2246.1	14	301	8.27	0%	0%	0%
4M	14	365	9.867	0%	220.27	14	406	9.956	0%	11.23%	-
4L	14	355	10.051	1,73%	3600	14	365	8.981	0%	2.82%	-
5S	13	404	6.556	0%	2.43	13	404	9.262	0%	0%	41.28%
5M	13	348	6.557	0%	2.43	13	348	8.562	0%	0%	30.58%
5L	13	333	7.418	0%	5.49	13	339	6.803	0%	1.8%	-

Tableau 6.53 – Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dep.	Dist.	Comp.	GAP	temps	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.
1S	13	317	10.184	0%	1065.56	13	320	10.707	0%	0.95%	-
1M	13	316	10.482	1,70%	3600	13	316	11.781	0%	0%	12.39%
1L	13	306	9.106	1,81%	3600	13	308	11.992	0%	0.65%	-
2S	14	461	7.597	0%	3.33	14	465	9.74	0%	0.87%	-
2M	14	355	9.228	0%	46.68	14	355	9.312	0%	0%	0.91%
2L	14	329	8.252	0%	185.25	14	329	8.252	0%	0%	0%
3S	15	358	9.639	1,84%	3600	15	367	13.548	0%	2.51%	-
3M	15	315	10.649	3,19%	3600	15	322	10.389	0%	2.22%	-
3L	15	310	10.265	3,28%	3600	15	319	10.437	0%	2.9%	-
5S	15	356	7.985	2,77%	3600	15	366	9.188	0%	2.81%	-
5M	15	328	7.409	3,03%	3600	15	328	8.127	0%	0%	9.69%
5L	15	309	8.052	3,24%	3600	15	310	9.129	0%	0.32%	-

Tableau 6.54 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dep.	Dist.	Comp.	GAP	temps	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.
1S	13	317	10.184	0%	1065.56	13	320	11.495	0%	0.95%	-
1M	13	316	10.482	1,70%	3600	13	321	11.337	0%	1.58%	-
1L	13	306	9.106	1,81%	3600	13	308	11.738	0%	0.65%	-
2S	14	461	7.597	0%	3.33	14	464	9.384	0%	0.65%	-
2M	14	355	9.228	0%	46.68	14	355	9.449	0%	0%	2.39%
2L	14	329	8.252	0%	185.25	14	335	9.301	0%	1.82%	-
3S	15	358	9.639	1,84%	3600	15	358	11.122	0%	0%	15.39%
3M	15	315	10.649	3,19%	3600	15	322	12.208	0%	2.22%	-
3L	15	310	10.265	3,28%	3600	15	321	9.808	0%	3.55%	-
5S	15	356	7.985	2,77%	3600	15	370	7.916	0%	3.93%	-
5M	15	328	7.409	3,03%	3600	15	328	9.698	0%	0%	30.89%
5L	15	309	8.052	3,24%	3600	15	310	7.355	0%	0.32%	-

Tableau 6.55 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dep.	Dist.	Comp.	GAP	temps	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.
1S	13	388	10.154	0%	3.43	13	408	9.968	0%	5.15%	-
1M	13	371	10.203	0%	4.81	13	371	10.203	0%	0%	0%
1L	13	359	10.255	0%	20.83	13	365	10.255	0%	1.67%	-
2M	14	443	10.062	0%	9.53	14	443	10.062	0%	0%	0%
2L	14	412	9.105	0%	30.15	14	412	9.105	0%	0%	0%
3S	15	474	10.618	0%	2.86	15	474	10.737	0%	0%	1.12%
3M	15	399	9.929	0%	558.2	15	416	10.586	0%	4.26%	-
3L	15	362	9.659	1,54%	3600.0	15	370	10.745	0%	2.21%	-
5S	15	425	7.753	0%	3.03	15	425	7.753	0%	0%	0%
5M	15	416	7.036	0%	25.39	15	416	7.036	0%	0%	0%
5L	15	380	7.182	0%	1665.99	15	388	7.394	0%	2.11%	-

Tableau 6.56 – Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dep.	Dist.	Comp.	GAP	temps	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.
1S	13	388	10.154	0%	3.43	13	408	11.474	0%	5.15%	-
1M	13	371	10.203	0%	4.81	13	371	11.216	0%	0%	9.93%
1L	13	359	10.255	0%	20.83	13	365	10.526	0%	1.67%	-
2M	14	443	10.062	0%	9.53	14	443	10.062	0%	0%	0%
2L	14	412	9.105	0%	30.15	14	412	9.105	0%	0%	0%
3S	15	474	10.618	0%	2.86	15	474	10.618	0%	0%	0%
3M	15	399	9.929	0%	558.2	15	416	10.586	0%	4.26%	-
3L	15	362	9.659	1,54%	3600	15	370	10.979	0%	2.21%	-
5S	15	425	7.753	0%	3.03	15	425	7.753	0%	0%	0%
5M	15	416	7.036	0%	25.39	15	416	7.036	0%	0%	0%
5L	15	380	7.182	0%	1665.99	15	388	7.394	0%	2.11%	-

Tableau 6.57 – Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dist.	Comp.	Dep.	GAP	temps	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.
1S	274	8.398	15	0%	0.74	274	8.73	15	0%	3.95%	-
1M	274	8.398	15	0%	3.21	274	8.398	15	0%	0%	0%
1L	262	8.837	15	0%	2.1	262	8.837	15	0%	0%	0%
2S	346	7.512	25	0%	0.07	346	7.989	20	0%	6.35%	-
2M	290	8.172	18	0%	2.12	290	8.172	18	0%	0%	0%
2L	277	8.174	15	0%	5.87	277	8.174	15	0%	0%	0%
3S	265	9.067	19	0%	0.43	265	9.197	19	0%	1.43%	-
3M	254	8.98	15	0%	2.49	255	8.926	15	0.39%	-	-
3L	251	8.98	15	0%	5.16	252	8.926	15	0.4%	-	-
4S	373	8.34	17	0%	3.28	384	9.122	16	2.95%	-	-
4M	335	8.255	19	0%	4.55	349	8.541	15	4.18%	-	-
4L	290	7.538	18	0%	44.02	305	9.605	15	5.17%	-	-
5S	313	7.309	14	0%	0.74	313	7.309	14	0%	0%	0%
5M	281	6.468	16	0%	0.74	281	6.482	15	0%	0.22%	-
5L	266	5.899	15	0%	1.2	266	6.292	15	0%	6.66%	-

Tableau 6.58 – Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dist.	Comp.	Dep.	GAP	temps	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.
1S	274	8.398	15	0%	0.74	274	8.398	15	0%	0%	0%
1M	274	8.398	15	0%	3.21	274	8.398	15	0%	0%	0%
1L	262	8.837	15	0%	2.1	262	8.881	15	0%	0.5%	-
2S	346	7.512	25	0%	0.07	346	7.512	25	0%	0%	0%
2M	290	8.172	18	0%	2.12	290	8.172	18	0%	0%	0%
2L	277	8.174	15	0%	5.87	277	8.174	15	0%	0%	0%
3S	265	9.067	19	0%	0.43	265	9.067	19	0%	0%	0%
3M	254	8.98	15	0%	2.49	255	9.592	15	0.39%	-	-
3L	251	8.98	15	0%	5.16	252	9.592	15	0.4%	-	-
4S	373	8.34	17	0%	3.28	385	8.454	16	3.22%	-	-
4M	335	8.255	19	0%	4.55	349	8.585	15	4.18%	-	-
4L	290	7.538	18	0%	44.02	305	9.079	19	5.17%	-	-
5S	313	7.309	14	0%	0.74	313	7.75	15	0%	6.03%	-
5M	281	6.468	16	0%	0.74	281	6.809	13	0%	5.27%	-
5L	266	5.899	15	0%	1.2	266	5.899	15	0%	0%	0%

Tableau 6.59 – Résultats - 1 type de ressource, 10% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dist.	Comp.	Dep.	GAP	temps	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.
1S	317	9.629	17	0%	0.49	320	10.365	17	0.95%	-	-
1M	316	9.444	17	0%	4.18	316	10.365	17	0%	9.75%	-
1L	300	8.695	16	0%	1.8	300	8.858	16	0%	1.87%	-
2S	440	8.492	19	0%	0.26	440	8.916	19	0%	4.99%	-
2M	341	7.825	21	0%	6.69	341	8.27	21	0%	5.69%	-
2L	313	7.769	21	0%	10.14	313	7.769	21	0%	0%	0%
3S	336	8.787	20	0%	0.45	344	10.243	17	2.38%	-	-
3M	315	10.048	17	0%	17.58	316	9.942	20	0.32%	-	-
3L	309	9.572	17	0%	64.09	310	9.869	17	0.32%	-	-
5S	356	7.94	17	0%	2.89	356	8.376	17	0%	5.49%	-
5M	313	7.112	18	0%	0.39	313	7.636	18	0%	7.37%	-
5L	301	7.061	17	0%	4.25	301	7.682	17	0%	8.79%	-

Tableau 6.60 – Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dist.	Comp.	Dep.	GAP	temps	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.
1S	317	9.629	17	0%	0.49	320	10.024	17	0.95	-	-
1M	316	9.444	17	0%	4.18	316	9.883	17	0%	4.65	-
1L	300	8.695	16	0%	1.8	300	8.695	16	0%	0%	0%
2S	440	8.492	19	0%	0.26	440	8.942	16	0%	5.3	-
2M	341	7.825	21	0%	6.69	344	8.903	16	0.88%	-	-
2L	313	7.769	21	0%	10.14	313	7.769	21	0%	0%	0%
3S	336	8.787	20	0%	0.45	344	10.683	17	2.38%	-	-
3M	315	10.048	17	0%	17.58	316	10.26	18	0.32%	-	-
3L	309	9.572	17	0%	64.09	310	9.869	17	0.32%	-	-
5S	356	7.94	17	0%	2.89	356	8.633	17	0%	8.73	-
5M	313	7.112	18	0%	0.39	313	7.112	18	0%	0%	0%
5L	301	7.061	17	0%	4.25	301	7.061	17	0%	0%	0%

Tableau 6.61 – Résultats - 1 type de ressource, 20% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dist.	Comp.	Dep.	GAP	temps	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.
1S	309	9.177	17	0%	0.24	309	9.177	17	0%	0%	0%
1M	302	9.228	17	0%	0.58	309	9.177	17	2.32%	-	-
1L	287	8.834	19	0%	0.49	287	8.834	19	0%	0%	0%
2S	415	8.892	18	0%	0.06	415	8.892	18	0%	0%	0%
2M	329	8.876	16	0%	0.31	329	8.876	16	0%	0%	0%
2L	324	8.876	16	0%	5.61	324	8.876	16	0%	0%	0%
3S	317	8.292	22	0%	0.21	325	8.916	18	2.52%	-	-
3M	291	8.832	20	0%	0.34	294	9.272	18	1.03%	-	-
3L	286	8.703	20	0%	0.67	288	9.479	16	0.7%	-	-
4M	348	10.56	16	0%	0.23	379	10.024	16	8.91%	-	-
4L	323	9.159	16	0%	6.97	341	10.234	16	5.57%	-	-
5S	363	7.576	18	0%	0.36	363	7.576	18	0%	0%	0%
5M	325	7.247	16	0%	0.62	325	7.247	16	0%	0%	0%
5L	304	6.919	20	0%	0.38	309	7.374	18	1.64%	-	-

Tableau 6.62 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dist.	Comp.	Dep.	GAP	temps	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.
1S	309	9.177	17	0%	0.24	309	9.177	17	0%	0%	0%
1M	302	9.228	17	0%	0.58	309	9.177	17	2.32%	-	-
1L	287	8.834	19	0%	0.49	287	8.834	19	0%	0%	0%
2S	415	8.892	18	0%	0.06	415	8.892	18	0%	0%	0%
2M	329	8.876	16	0%	0.31	329	8.876	16	0%	0%	0%
2L	324	8.876	16	0%	5.61	324	8.876	16	0%	0%	0%
3S	317	8.292	22	0%	0.21	325	8.916	18	2.52%	-	-
3M	291	8.832	20	0%	0.34	294	9.272	18	1.03%	-	-
3L	286	8.703	20	0%	0.67	288	9.479	16	0.7%	-	-
4M	348	10.56	16	0%	0.23	379	10.099	16	8.91%	-	-
4L	323	9.159	16	0%	6.97	341	10.711	16	5.57%	-	-
5S	363	7.576	18	0%	0.36	363	7.576	18	0%	0%	0%
5M	325	7.247	16	0%	0.62	325	7.247	16	0%	0%	0%
5L	304	6.919	20	0%	0.38	309	7.374	18	1.64%	-	-

Tableau 6.63 – Résultats - 2 types de ressource, 10% d'activités synchronisées - *MW*

	PLNE					<i>BW</i>			GAP		
	Dist.	Comp.	Dep.	GAP	temps	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.
1S	381	11.88	15	0%	0.43	385	12.008	14	1.05%	-	-
1M	359	11.069	20	0%	0.65	359	11.069	20	0%	0%	0%
1L	345	9.807	16	0%	3.15	346	10.399	16	0.29%	-	-
2M	402	9.956	23	0%	11.01	407	9.923	17	1.24%	-	-
2L	367	9.311	22	0%	15.77	372	9.193	20	1.36%	-	-
3S	437	9.941	20	0%	0.7	442	11.207	16	1.14%	-	-
3M	368	9.783	16	0%	3.86	379	9.466	16	2.99%	-	-
3L	354	9.488	18	0%	9.33	360	9.876	16	1.69%	-	-
5S	415	7.547	18	0%	0.23	419	7.644	18	0.96%	-	-
5M	377	7.513	20	0%	0.63	381	7.61	18	1.06%	-	-
5L	334	7.695	20	0%	0.45	341	7.822	18	2.1%	-	-

Tableau 6.64 – Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *BW*

	PLNE					<i>MW</i>			GAP		
	Dist.	Comp.	Dep.	GAP	temps	Dist.	Comp.	Dep.	Dist.	Comp.	Dep.
1S	381	11.88	15	0%	0.43	385	12.381	14	1.05%	-	-
1M	359	11.069	20	0%	0.65	359	11.069	20	0%	0%	0%
1L	345	9.807	16	0%	3.15	346	10.399	16	0.29%	-	-
2M	402	9.956	23	0%	11.01	407	9.923	17	1.24%	-	-
2L	367	9.311	22	0%	15.77	372	9.193	20	1.36%	-	-
3S	437	9.941	20	0%	0.7	442	10.232	16	1.14%	-	-
3M	368	9.783	16	0%	3.86	379	9.466	16	2.99%	-	-
3L	354	9.488	18	0%	9.33	360	10.407	16	1.69%	-	-
5S	415	7.547	18	0%	0.23	419	7.644	18	0.96%	-	-
5M	377	7.513	20	0%	0.63	381	7.61	18	1.06%	-	-
5L	334	7.695	20	0%	0.45	341	7.822	18	2.1%	-	-

Tableau 6.65 – Résultats - 2 types de ressource, 20% d'activités synchronisées - *MW*

Annexe 3 - Notation and classification for logistic network design - Gayraud et al. (2015)

NOTATION AND CLASSIFICATION FOR LOGISTIC NETWORK DESIGN MODELS

FABRICE GAYRAUD¹, NATHALIE GRANGEON¹, LAURENT DEROUSSE¹ AND SYLVIE NORRE¹

Abstract. This paper presents a notation and a classification system for the design models of logistic network. Our notation consists of three fields (analogous to Graham's $\alpha|\beta|\gamma$ notation for scheduling problems). The proposed notation is applied for several articles from the literature. We focus on multi-period models with deterministic and stochastic demands. The proposed notation is based on three criteria corresponding to the main characteristics of the logistic networks: the structure (field α), the management rules (field β) and the performance criteria (field γ). A description of solution methods, datasets and results is also provided. Most articles deal with deterministic, multi-level models and only few of them include the international aspect of logistics, lead-times or subcontracting. Datasets used to test the methods are randomly generated by the authors and have different sizes. The heuristic methods are most commonly used.

Keywords. Design, logistic network, classification, notation, facility location, dataset, performance criterion.

Mathematics Subject Classification. — Please, give AMS classification codes —.

1. INTRODUCTION

1

A logistic network is a set of locations where a facility can be opened (supplier, production plant, warehouse or distribution center). All locations are linked by

2

3

Received September 9, 2014. Accepted September 11, 2014.

¹ LIMOS CNRS UMR 6158 – Antenne IUT d'Allier, Avenue Aristide Briand, 03100 Montluçon, France. fabrice.gayraud@moniut.univ-bpclermont.fr

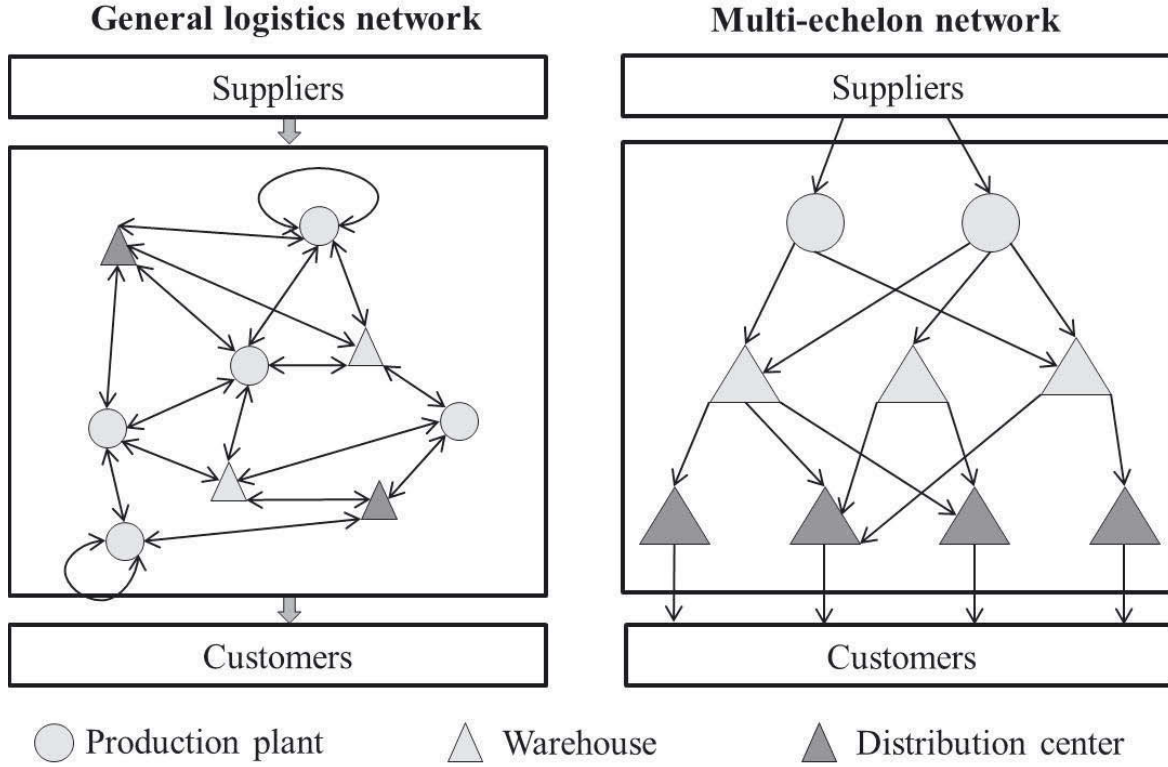


FIGURE 1. Modelling of logistics network.

roads and products are transferred through these roads. Martel [14] explained that there are two models for the logistic network in the literature (Fig. 1):

- a **general logistic network** is composed of different facilities (supplier, production plant, warehouse, distribution center) linked together by roads,
- a **multi-echelon network** prioritizes the facilities and defines existing roads between two successive facility levels.

In an increasing competitive industrial environment, the search for better costs is a constant concern. An efficient logistic network is a cost reduction source. According to Ambrosino and Scutellà [1], “these problems consist of determining the best way to transfer goods from the supply to the demand points (customers) by choosing the structure of the network while minimizing the overall costs”.

Melo *et al.* provide a detailed review of reference [17], describing a possible model of network structure (nature of the planning horizon, single or multi period, the type of datas and the number of echelons). They proposed a classification of the literature according to typical logistic decisions such as capacity, inventory, procurement, production, routing and transport mode. But the authors do not give detailed information about the costs and the management rules of the network. In this paper, we will address multi-period models to better design and evolve a logistic network. We will focus on the characteristics such as costs, the

structure of the network and management rules. To classify the different models, we propose a notation inspired by the Graham's notation $\alpha|\beta|\gamma$ which is used for scheduling problems [8]. α is the physical description of the model, β describes the management rules of the model and γ is both the performance criteria and the data used to compute them. For each model, we summarize the solution methods, the dataset size and the results. The papers have been chosen in the literature to enhance many constraints and management rules in the multi-period models. We illustrate our notation with twenty recent papers.

In Section 2 the context of the study will be specified as well as the proposed notation. Then, Section 3 is dedicated to single-echelon and multi-echelon deterministic models. The models with stochastic demands are described in Section 4. In these sections, initially, the description of a basic model is given. Then the main variants, solving methods and datasets are described.

2. CONTEXT AND NOTATION

The first models proposed in the literature are single-period models. They design an optimal logistic network with a known demand. These models are:

- *k-median problem* proposed by Kuehn and Hamburger in 1963 [13].
- *Uncapacitated Plant Location Problem (UPLP)* defined by Erlenkotter in 1978 [6].
- *Capacitated Plant Location Problem (CPLP)* defined by Sá in 1969 [21]

The *k-median problem* consists in opening a given number k of facilities selected from a set of available locations. The goal is to minimize the sum of the distances between the facilities and the customers. The *UPLP* is obtained from the *k-median problem* by releasing the constraint that fixes the number of facilities. The facilities are uncapacitated. The *CPLP* is similar to the *UPLP* but the facilities have a capacity constraint. The main drawback of these models is that they cannot adjust or anticipate developments of the economic situation. That is why some multi-period models have been developed. These models introduce periods (for instance years) and facilities can open or close during a period.

We propose a classification of multi-period models which differs in the considered structure of networks, management rules and performance criteria. We have summarized all these characteristics in Tables 1–3. The proposed notation is labeled in brackets. The three fields of the notation are:

- The network structure (α field)
 - **General Logistic Network (GLN)** or **Multi-Echelon Network (MEN)** (*cf.* Fig. 1),
 - **single-echelon (1E)** or **multi-echelon (nE)**. The customer demands, and the location of a single-level of the logistic network, are considered in a single-echelon model. Generally the level is composed of warehouses. When several levels in the network are considered, we refer to a multi-echelon

TABLE 1. Network structure.

	E	GLN	MEN	P	$F.FC$	$Inter$	BOM	LT	$Tr.FC$	$Tr.M$	SA
Dias <i>et al.</i> [3]	1		X	1	X						
Saldanha-da-Gama <i>et al.</i> [22]	1		X	1							X
Melo <i>et al.</i> [16]	1		X	n	X						
Ghaderi <i>et al.</i> [7]	1		X	1							
Hinojosa <i>et al.</i> [11]	n		X	n	X						
Canel <i>et al.</i> [2]	n		X	1	X				X		
Melachrinoudis <i>et al.</i> [15]	n	X		n	X						
Syam [26]	n		X	n	X				X		
Ambrosino <i>et al.</i> [1]	n	X		1	X				X	X	
Martel [14]	n	X		1	X	X	X				
Vila <i>et al.</i> [32]	n	X		n	X	X	X		X		
Pirard [19]	n	X		n	X	X	X				
Hinojosa <i>et al.</i> [12]	n		X	n	X		X				X
Thanh <i>et al.</i> [27, 28]	n	X		n	X		X				
Suon [24]	n		X	n	X	X	X		X	X	
Pan <i>et al.</i> [18]	n		X	1	X		X	X	X		
Shankar <i>et al.</i> [23]	n		X	1	X		X				
Tsao <i>et al.</i> [29]	n		X	1				X	X	X	X
Hameur-Lavoie <i>et al.</i> [10]	n		X	n	X			X	X	X	
Ramezani <i>et al.</i> [20]	n		X	n	X				X		

model. The goal of a two-echelon model is to locate production plants and warehouses for example.

- **single-product** ($1P$) or **multi-product** (nP) model,
- **finite capacity facility** ($F.FC$),
- **international network** ($Inter$),
- **Bill Of Materials** (BOM): list of the raw materials and sub-components to manufacture a product,
- **lead-time** (LT): transport time between two facilities,
- **transport capacity** ($Tr.FC$): transport capacities are considered,
- **transport mode** ($Tr.M$): selection of the transport mode,
- **Single-Allocation** (SA): when a customer is delivered by only one supplier.
- Management rules (β field)
 - **deterministic** (DD) or **stochastic** (SD) demands,
 - **type of inventory** (Inv): possibility of taking into account seasonal stocks (to smooth the production of each period), safety stocks (to manage a fluctuating demand) or order cycle stocks (in relation to batch production),

TABLE 2. Management rules.

	<i>Demand</i>	<i>Inv</i>	<i>OC</i>	<i>Tech</i>	<i>MC</i>	<i>SC</i>	<i>MP</i>	<i>BC</i>
Dias <i>et al.</i> [3]	D		X		X			
Saldanha-da-Gama <i>et al.</i> [22]	D		X					
Melo <i>et al.</i> [16]	D		X		X			
Ghaderi <i>et al.</i> [7]	D		X					X
Hinojosa <i>et al.</i> [11]	D		X					
Canel <i>et al.</i> [2]	D		X					
Melachrinoudis <i>et al.</i> [15]	D		X		X			X
Syam [26]	D	X	X					
Ambrosino <i>et al.</i> [1]	D	X	X					
Martel [14]	D	X	X	X	X		X	
Vila <i>et al.</i> [32]	D	X	X	X	X			
Pirard <i>et al.</i> [19]	D		X		X			
Hinojosa <i>et al.</i> [12]	D		X		X			
Thanh <i>et al.</i> [27, 28]	D	X	X		X	X		
Suon [24]	D	X	X	X	X			
Pan <i>et al.</i> [18]	D		X					
Shankar <i>et al.</i> [23]	D	X	X					
Tsao <i>et al.</i> [29]	S	X	X					
Hameur-Lavoie <i>et al.</i> [10]	S	X	X					
Ramezani <i>et al.</i> [20]	S		X					

- **opening/closing** (*OC*): possibility of opened or closed the facilities (suppliers, warehouses, production plants, ...) during the planning horizon, 1
- **technology** (*Tech*): storage and/or production of some products that require particular equipments, 2
- **modular capacities** (*MC*): the facility capacity may change between two periods, 3
- **sub-contracting** (*SC*): a part of production can be done by another company, 4
- **marketing policies** (*MP*): price that a market will bear for each product. 5
- **budget constraints** (*BC*): the budget to enable the network growth is limited. 6
- The performance criteria (γ field) 7
- The main objectives are: 8
- minimizing total costs (*C*), 9
- minimizing Carbon Emissions (*CE*), 10
- maximizing economic Profit (*P*), 11
- maximizing the Quality of Service (*QoS*), 12
- maximizing the facility Fill Rate (*FR*), 13
- minimizing the Rate of Faulty Raw material (*RFR*) (this criterion appears in models that include reverse logistics). 14

TABLE 3. Performance criteria and costs.

	<i>C</i>	<i>P</i>	<i>QoS</i>	<i>FR</i>	<i>RFR</i>	<i>Tr</i>	<i>F</i>	<i>OC</i>	<i>Inv</i>	<i>Inter</i>	<i>AR</i>
Dias <i>et al.</i> [3]	X						X	X			
Saldanha-da-Gama <i>et al.</i> [22]	X						X	X			
Melo <i>et al.</i> [16]	X					X	X	X	X		
Ghaderi <i>et al.</i> [7]	X					X	X	X			
Hinojosa <i>et al.</i> [11]	X					X	X				
Canel <i>et al.</i> [2]	X					X	X	X			
Melachrinoudis <i>et al.</i> [15]	X					X	X	X	X		
Syam [26]	X					X	X		X		
Ambrosino <i>et al.</i> [1]	X					X	X	X	X		
Martel [14]		X				X	X	X	X	X	X
Vila <i>et al.</i> [32]		X				X	X	X	X		X
Pirard <i>et al.</i> [19]		X				X	X	X	X	X	X
Hinojosa <i>et al.</i> [12]	X					X	X	X			
Thanh <i>et al.</i> [27], [28]	X		X			X	X	X	X		
Suon [24]	X					X	X	X		X	
Pan <i>et al.</i> [18]	X					X	X		X		
Shankar <i>et al.</i> [23]	X			X		X	X	X	X		
Tsao <i>et al.</i> [29]	X					X	X		X		
Hameur-Lavoie <i>et al.</i> [10]	X					X		X	X		
Ramezani <i>et al.</i> [20]		X	X		X	X	X	X			X

The considered costs to assess the economical objective are given between brackets. For instance, $C(OC, Inv)$ describes a model when the objective is to minimize the total costs computed using opening and closure (OC) and inventory (Inv) costs.

- **transport and distribution** costs (Tr) between the facilities of the logistic network,
- **processing facility** costs (F), the use of facility costs,
- **opening/closure** costs (OC) for a facility,
- **inventory** costs (Inv) for raw materials, semi-finished and finished products,
- **import and export** costs ($Inter$) related to the movement of goods in an international network,
- **amount received for the sales** (AR): the costs of the products depend on the customers at each periods.

Table 1 summarizes the characteristics of the logistic network in the studied models from the literature. Table 2 lists the management rules and Table 3 lists the performance criteria taken into account in the different models.

To the best of our knowledge, no multi-period models with an environmental criterion exists. We will include this criterion in our notation because it is increasingly becoming important. Indeed, we can find single period models such as the

one considered by Xifen *et al.* [34]. Using the presented notation, this problem is denoted $MEN, 1E, 1P, F.FC, SA|DD|C(Tr, F), CE, QoS$. The authors present a single-echelon single-product model on one period. It is an extension of the *UPLP* with three performance criteria. The customer location is known and each customer is supplied by only one facility. The problem consists in opening some facilities selected from a set of available locations. The three objectives are :

- minimizing costs noted (C),
- maximizing the quality of service (QoS),
- minimizing carbon emissions (CE).

In the following section, models with deterministic demands are presented.

3. MODELS WITH DETERMINISTIC DEMANDS

3.1. SINGLE-ECHELON MODELS

A deterministic single-product model called *Simple Dynamic Location Problem* proposed by Saldanha da Gama and Captivo in 1998 [22] is first presented. By using the exposed notation this model is noted $MEN, 1E, 1P, SA|DD, OC|C(F, OC)$. It is an extension of *UPLP* within the frame of a multi-period horizon. The network is composed of warehouses. The goal is to locate facilities by minimizing the sum of opening costs and processing costs. The authors made the following hypotheses:

- opening and closure are instantaneous,
- the establishment (respectively removal) of a facility must happen at the beginning (respectively end) of a time period,
- the facilities have no capacity,
- a facility can change its status only once during the planning horizon,
- from now until the beginning of the planning horizon it is possible to remove facilities,
- no facility will be closed in the last period of the planning horizon.

The notations used in the model are:

TP	set of time period,	
I	set of customers,	
J	set of locations where facilities can be established,	
c_{ij}^t	cost of satisfying the demand of customer i by a facility processing at location j in time period t ,	
o_j^t	cost to open a facility at location j in time period t ,	

The subset J_f (resp. J_o) is the set of locations where facilities can be removed (resp. established). $J = J_o \cup J_f$. The decision variables are :

$$\begin{aligned}
 x_{ij}^t &= 1 && \text{if the demand of customer } i \text{ is satisfied by a facility located at } j \text{ in time period } t, 0 \text{ otherwise} \\
 u_j^t &= 1 && \text{if there is a used facility at location } j \text{ in time period } t, 0 \text{ otherwise}
 \end{aligned}$$

1 The authors present a linear formulation. The objective function is:

$$\min \sum_{t \in TP} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}^t \cdot x_{ij}^t + \sum_{t \in TP} \sum_{j \in J} o_j^t \cdot u_j^t \quad (3.1)$$

2 and the set of constraints is:

$$\sum_{j \in J} x_{ij}^t = 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in TP \quad (3.2)$$

$$x_{ij}^t - u_j^t \leq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in TP \quad (3.3)$$

$$u_j^{t+1} - u_j^t \leq 0 \quad \forall j \in J_f, \forall t \in \{1, \dots, T-1\} \quad (3.4)$$

$$u_j^{t+1} - u_j^t \geq 0 \quad \forall j \in J_o, \forall t \in \{1, \dots, T-1\} \quad (3.5)$$

$$x_{ij}^t \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in TP \quad (3.6)$$

$$u_j^t \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, \forall t \in TP \quad (3.7)$$

9 The considered performance criteria is the sum of the costs (3.1). Con-
 10 straints (3.2) ensure that the demand is satisfied by one facility. Constraints (3.3)
 11 guarantee that no customer will be assigned to a closed facility. Constraints (3.4)
 12 and (3.5) guarantee that an opened facility cannot be closed and a closed fa-
 13 cility cannot be opened. Additionally, the variables are binary according to the
 14 constraints (3.6) and (3.7). Then the authors complete the model by taking into
 15 account opening and closure costs, $MEN, 1E, 1P|DD, OC|C(F, Tr, OC)$. To solve
 16 the problem, the authors propose a heuristic based on two steps. The first step is
 17 an heuristic called DROP described by Domschke and Drexl in 1983 [4]. The sec-
 18 ond step is a local search. The dataset is randomly generated. $|I|$ varies between 10
 19 and 500, $|J|$ takes the value 5, 10 or 20. Saldanha da Gama and Captivo compare
 20 their results with the ones obtained by Van Roy and Erlenkotter in 1982 [31]. The
 21 gap between the two methods is between 0.13 and 6.77 and the two-step-heuristic
 22 of [22] is faster.

23 In 2006, Melo *et al.* [16] proposed a model in which the facility capacities are con-
 24 sidered as a decision variable, $MEN, 1E, nP, F.FC|DD, OC, MC|C(F, OC, Tr,$
 25 $Inv)$. Thus, facilities have an evolving finite capacity. A part of the capacity move-
 26 ment is allowed between two opened facilities. Moreover, they include distribution
 27 and transport, inventory and processing facility costs. In the second part of the pa-
 28 per, they generalize the model with two echelons. This type of model is described
 29 in the following section.

30 In 2006, Dias *et al.* [3] described a deterministic model. The characteristics of
 31 the models are single-echelon, single-product with opening and closing facilities,
 32 $MEN, 1E, 1P, F.FC|DD, OC, MC|C(F, OC)$. In these models, more than one fa-
 33 cility can supply a customer, a closed facility can be reopened, and the authors
 34 include modular capacity.

Recently Ghaderi *et al.* [7] propose a multi-period single-echelon model to design a logistic network, $MEN, 1E, 1P|DD, OC, BC|C(Tr, F, OC)$. They include budget constraints. The aim is to create care centers in developing countries in order to facilitate the access to health care. In each period, the company have a maximum budget to open facilities and to build distribution roads. The remaining budget may be reallocated to the next period. The considered costs are opening facilities, processing facilities and transport costs. The model is non-linear due to budget constraints. The authors proposed two methods to determine the logistic network. The first method consists in fixing some variables and implementing the model in a solver. The second method is a hybrid simulated annealing heuristic.

In this section, we described multi-period single-echelon models to design logistic networks. But the networks have an increasing complexity, the warehouse location depends on not only the customers but also the production plants, suppliers, ... The logistic network must be considered as a whole. Design models evolve by integrating the location of several levels from the network. Multi-echelon models should be able to respond to this new trend.

3.2. MULTI-ECHELON MODELS

The first model was proposed by Hinojosa *et al.* in 2000 [11], $MEN, 2E, nP, F.FC|DD, OC|C(Tr, F)$. It is a multi-product model with two echelons. It is possible to open or close facilities. The network is composed of production plants, warehouses and customers and modeled such as a multi-echelon network. The assumptions made by the authors are:

- the facilities have a finite capacity which depends on the period,
- a minimum number of warehouses must be opened at the beginning of the first period and at the end of the last period,
- a closed (respectively opened) facility may be opened (respectively closed) at the beginning (resp. end) of each period,
- a facility can change its status only once in the planning horizon.

The notations used in the model are:

TP	set of time periods	
I	set of customers	
J	set of possible warehouses	
K	set of possible production plants	
L	set of product types	
d_{il}^t	demand of product of type $l \in L$ by customer $i \in I$ at a time period $t \in TP$	
w_j^t	capacity of warehouse $j \in J$ at a time period $t \in TP$	30
s_k^t	capacity of production plant $k \in K$ at a time period $t \in TP$	
f_j^t	processing cost of a warehouse opened at location $j \in J$ at a time period $t \in TP$	
g_k^t	processing cost of a production plant opened at location $k \in K$ at a time period $t \in TP$	

c_{ijl}^t costs of transport for a type of product $l \in L$ from warehouse $j \in J$ to customer $i \in I$ at a time period $t \in TP$

b_{jkl}^t costs of transport for a product $l \in L$ from production plant $k \in K$ to warehouse $j \in J$ at a time period $t \in TP$

ND^1 and NC^1 (respectively ND^T and NC^T) are the minimum number of warehouses and production plants opened at the beginning of the first time period (respectively the last time period). The subsets J_f (set of facilities which can be closed) and J_o (set of facilities which can be opened) form a partition of the set J . Similarly, K_o and K_f form a partition of the set K .

The decision variables are:

x_{ijl}^t fraction of the type of product $l \in L$ delivered to customer $i \in I$ from the warehouse $j \in J$ at a time period $t \in TP$

y_{jkl}^t fraction of the type of product $l \in L$ sent to a production plant $k \in K$ from warehouse $j \in J$ at a time period t

u_j^t = 1 if a warehouse $j \in J$ is opened at the beginning of time period t , 0 otherwise

v_k^t = 1 if a production plant $k \in K$ is opened at the beginning of time period t , 0 otherwise

$$C_1 = \sum_{t \in TP} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} c_{ijl}^t \cdot x_{ijl}^t \cdot d_{il}^t \quad (3.8)$$

$$C_2 = \sum_{t \in TP} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} b_{jkl}^t \cdot y_{jkl}^t \cdot s_j^t \quad (3.9)$$

$$C_3 = \sum_{t \in TP} \sum_{j \in J} f_j^t \cdot u_j^t + \sum_{t \in TP} \sum_{k \in K} g_k^t \cdot v_k^t \quad (3.10)$$

Objective function:

$$\text{minimize } C_1 + C_2 + C_3 \quad (3.11)$$

under constraints:

$$\sum_{j \in J} x_{ijl}^t \geq 1 \quad \forall i \in I, \forall l \in L, \forall t \in TP \quad (3.12)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} d_{il}^t \cdot x_{ijl}^t \leq w_j^t \cdot u_j^t \quad \forall j \in J, \forall t \in TP \quad (3.13)$$

$$\sum_{k \in K} w_j^t \cdot y_{jkl}^t \geq \sum_{i \in I} d_{il}^t \cdot x_{ijl}^t \quad \forall j \in J, \forall l \in L, \forall t \in TP \quad (3.14)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L} w_j^t \cdot y_{ijl}^t \leq s_k^t \cdot v_k^t \quad \forall k \in K, \forall t \in TP \quad (3.15)$$

$$\sum_{j \in J} u_j^1 \geq ND^1 \quad (3.16)$$

1

$$\sum_{j \in J} u_j^T \geq ND^T \quad (3.17) \quad 2$$

$$\sum_{k \in K} v_k^1 \geq NC^1 \quad (3.18) \quad 3$$

$$\sum_{k \in K} v_k^T \geq NC^T \quad (3.19) \quad 4$$

$$u_j^1 = 1, u_j^t - u_j^{t+1} \geq 0 \quad \forall j \in J_f, \forall t \in \{1, \dots, T-1\} \quad (3.20) \quad 5$$

$$u_j^t - u_j^{t+1} \leq 0 \quad \forall j \in J_o, \forall t \in \{1, \dots, T-1\} \quad (3.21) \quad 6$$

$$v_k^1 = 1, v_k^t - v_k^{t+1} \geq 0 \quad \forall k \in K_f, \forall t \in \{1, \dots, T-1\} \quad (3.22) \quad 7$$

$$v_k^t - v_k^{t+1} \leq 0 \quad \forall k \in K_o, \forall t \in \{1, \dots, T-1\} \quad (3.23) \quad 8$$

$$x_{ijl}^t \geq 0, y_{jkl}^t \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad 9$$

$$\forall l \in L, \forall t \in TP \quad (3.24) \quad 10$$

$$u_j^t, v_k^t \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, \forall k \in K, \forall t \in TP \quad (3.25) \quad 11$$

The goal is to locate facilities (production plants and warehouses) and to define the fraction of a product delivered to each customer from a warehouse by minimizing the sum of transport costs between warehouses and customers (3.8), transport costs between production plants and warehouses (3.9) and processing facility costs (3.10). Equation (3.11) gives the objective function.

Constraints (3.12) ensure that a customer receives his demand for each type of products at each period. The capacity of warehouses and production plants are satisfied in accordance with constraints (3.13) and (3.15). Constraints (3.14) make sure that production plants give enough products to warehouses. Constraints (3.16) to (3.19) ensure that the minimum number of opened facilities at the first and the last period is respected. Constraints (3.21) to (3.23) verify that a facility can change its status maximum once in the planning horizon. The variables x_{ijl}^t and y_{jkl}^t are positive and the variables u_j^t and v_k^t are binary according to constraints (3.24) and (3.25). The authors use a Lagrangian relaxation to compute a lower bound and a two-step-heuristic to obtain a feasible solution. The method has been applied on randomly generated datasets. The number of customers is between 10 and 75, the number of warehouses is between 5 and 40, the number of production plants is between 5 and 40 and the number of products types is 2 or 3. The gap between the lower bound and the solution found with the heuristic varies between 0.24% and 5%. For the small and medium datasets the gap with the optimal solution is between 0.17% and 2.7%. In this case the optimal solution was found by a solver. However, for the large datasets, the solver does not find the optimal solution.

In 2001, Canel *et al.* [2] proposed a single-product model, $MEN, 2E, 1P, F.FC, Tr.FC|DD, OC|C(Tr, F, OC)$. They added transport constraints and capacity to the roads. In addition they considered that opening and closure facility costs depend on the period. The method to solve the problem is composed of three phases.

The first phase is to identify the facilities to be opened or closed. The second phase is to find a feasible solution. The third phase uses dynamic programming to obtain the optimal solution (evaluation of the different networks obtained in the second phase). The algorithm was tested on the datasets described by Sweeny *et al.* in 1976 [25]. Sweeney *et al.* solve the problem with a Bender's decomposition and dynamic programming. The size of the datasets is: 3 production plants, 5 warehouses, 15 customers and 5 periods. The three-phase-heuristic by Canel *et al.* finds the same solutions with shorter computational times.

In 2002, Syam [26] also proposed a multi-product model with two echelons, $MEN, 2E, nP, F.FC, Tr.FC|DD, OC, Inv|C(Tr, F, Inv)$. The additional characteristics concern the inventory, the purchase and the consolidation of transport. The inventory costs are added to the objective function. Products that one delivered with the same frequency, along the same road, are delivered together. This leads to economies of scale on the costs of transport. The goal of the model is to determine the network structure, the flow between the facilities and the delivery frequency for products while minimizing costs. The suggested method for this problem is composed of two phases: a simulated annealing to determine the facilities to open (production plants and warehouses) and a Lagrangian relaxation to find out the optimal consolidation policies. The datasets are randomly generated from 10 to 100 production plants and 2 to 20 warehouses. The company manufactures 5 types of products. For the small datasets, the gap between the optimal solution and the solution obtained with Lagrangian relaxation is between 0.42% and 1.66% and the computational time is between 0.5 and 1 second. For the proposed method, the gap is between 0.35% and 4.17% for the same computational time. For the large datasets, computational times are between 2 and 152 seconds for the Lagrangian relaxation and between 5 and 329 seconds for the heuristic. Lagrangian relaxation obtains better results in 90% of cases.

In 2005, Pirard *et al.* [19] propose a hybrid heuristic method to reconfigure a logistic network, $GLN, 3E, nP, F.FC, Inter, BOM|DD, OC, MC|P(Tr, F, OC, Inv, Inter, AR)$. This is a multi-echelon and multi-product model and it can be used whatever the number of echelons is. The goal is to maximize the profit after taxation. The model includes inventory, distribution, production costs, import and export taxes, and amount received for the sales. It is possible to transfer a fraction of capacity from a facility to another. It takes into account the bill of materials. To solve the problem, the authors use a branch and bound but this method generates higher computational times for industrial datasets. To solve this problem, they take an iterative approach. The problem is separated into subproblems. Each subproblem is solved with a local search and simplex algorithm. They obtain a quality feasible solution in a reasonable time. This method is applied in the case of a company composed of 16 facilities. The company makes 20 types of products based on 45 components. It has also 20 customers. The components are bought from 10 suppliers. The planning horizon is divided into five periods. The gap between the optimal solution and the heuristic solution is between 0.04% and 0.19%.

Computational times are between 12h58 and 243h18 to find out the optimal solution with an exact method. The heuristic method offers results between 2h56 and 3h02.

In 2005, Martel [14] proposes a logistic network design model for an international company, $GLN, 2E, 1P, F.FC, BOM, Inter|DD, Inv, OC, Tech, MC, MP|P(Tr, F, OC, Inv, Inter, AR)$. Instead of a multi-echelon network, the author considers a general logistic network. The author considers three types of nodes located in several countries such as external suppliers, internal potential facilities and customers. Three types of inventory are modeled: safety stocks, seasonal stocks and order cycle stocks. The author considers the costs of transfer between facilities (transport) and import and export costs. Then, he introduces a choice of marketing policies. A marketing policy defines the costs of the product depending on the customer at each period. This describes the amount received for all the products' sales. He also includes technologies necessary to manufacture the products. It is possible to install a technology or reconfigure an open facility. The goal is to determine the logistic network while maximizing the profit. The model is non-linear. The author proposes to linearize non-linear constraints and to solve the resulting problem with a commercial linear solver.

In 2008, Thanh *et al.* [27, 28] addresses with a three echelons model; $GLN, 3E, nP, F.FC, BOM|DD, Inv, OC, MC, SC |C(Tr, F, OC, Inv), QoS$. The network is composed of suppliers, production plants, warehouses and customers and transfers between production plants are possible so the production may be shared in several steps made by different production plants. This model allows one to locate and open or close facilities, optimize material flows while minimizing the network total costs. The management of the network is controlled by:

- a purchasing strategy: several suppliers can supply the same plant for the same product. In the case of the purchase of several raw materials, suppliers may offer a discount,
- a production strategy: batch production,
- an inventory strategy: no stock in the production plant, seasonal and safety stocks in the warehouses,
- a distribution strategy: customers are supplied by warehouse except for the big customers supplied by production plants.

In this work, the modeling cost is more detailed. Thanh adds supplier selection costs, discount policies according to ordered quantities, sub-contracting costs and processing facilities costs. The assumptions made by the author are:

- facilities have a finite capacity,
- each facility produces one or more type of products,
- the facility capacity is flexible,
- a facility has a minimum and a maximum percentage of use,
- a facility can only change its status once in the planning horizon,
- the capacity of an opened facility progressively increases over each period,
- a production plant may sub-contract a part of its production,

- two types of warehouses are available: public (leased by the company) or private (property of the company),
- a warehouse has two types of capacity: storage and processing of transit stock.

To solve the problem, the author proposes three methods, a linear relaxation, D.C. programming (Difference of Convex functions) and a Lagrangian relaxation. These three methods are tested with randomly generated datasets of three sizes (small, medium and large). The planning horizon is composed of five periods. The datasets are composed of 15 to 27 suppliers, 10 to 22 production plants, 5 to 13 warehouses, 100 to 270 customers and 10 to 18 types of products. The results are presented according to two criteria which are the computational time and the value of the objective function. For the small datasets, the linear relaxation is faster. For the other datasets, D.C. programming is faster. Concerning the objective function value, Lagrangian relaxation gives the best results and linear relaxation is the least effective method for all datasets.

Recently, Pan *et al.* [18] give a multi-level model, multi-echelon network. The model can be used with any number of levels. At each level, an operation is performed according to a bill of materials, $MEN, nE, 1P, F.FC, BOM, LT, Tr.FC | DD, OC | C(Tr, F, Inv)$. The production time added to the travel time to reach the next level corresponds to a period (lead-time). The authors assume that the model is single-product, the transport is single-modal with a capacity. The considered costs in this model are related to the transport, the production, the storage and the purchase of raw materials. At each level, the choice of which facilities should be opened to manufacture the desired quantity of products in order to minimize the sum of the costs is determined. To do that, the authors proposed a Lagrangian relaxation and tested this method on randomly generated datasets.

In 2013, Shankar *et al.* [23] proposed a bi-objective model of logistic network design with three echelons (suppliers, production areas, warehouses and customers), $MEN, 3E, 1P, F.FC, BOM | DD, Inv, OC | C(Tr, F, OC, Inv), FR$. Potential sites and their capacity are set by the managers. The objectives are to define the quantity of raw materials to purchase from each supplier, the facility location to be opened and the roads to be used in order to minimize the fixed and variable costs such as the procurement of raw materials, transport, production and storage and to maximize fill rate of the opened facilities. The problem is formulated as a mixed integer mathematical model. The proposed resolution method is a multi-objective particle swarm optimization (MOHPSO) determining a set of dominant solutions.

Many other works can be quoted related to multi-period and multi-echelon logistic network design models. The specificity of the proposed model in [1] lies in the allocation of stored quantities in different platforms, the choice of distribution routes and the possibility to classify customers according to the ordered volume. Then, Vila *et al.* [32] proposed a model that integrates the choice of suppliers, manages the inventory in a seasonal activity within an international network. Hinojosa *et al.* in 2008 [12] consider the maintenance costs in the processing costs of the facilities. Finally, [24] introduces investments in his works taking into account

the depreciation on the considered horizon. 1

According to the notation, these models can be classified as follow: 2

- $GLN, 2E, 1P, F.FC, Tr.FC, Tr.M|DD, Inv, OC|C(Tr, F, OC, Inv)$ [1] 3
- $GLN, nE, nP, F.FC, Inter, BOM, Tr.FC|DD, Inv, OC, Tech, MC|P(Tr, F, OC, Inter, Inv, AR)$ [32], 4
- $MEN, 2E, nP, F.FC, BOM|DD, OC, MC|C(Tr, F, OC)$ [12], 6
- $MEN, 2E, nP, F.FC, Inter, BOM, Tr.FC, TR.M|DD, Inv, Tech, MC, OC, |C(Tr, F, Inter, OC)$ [24]. 8

4. MODELS WITH STOCHASTIC DEMANDS 9

In 2006, Hameur-Lavoie *et al.* [10] get interest in a multi-level, multi-product location problem considering the inventory and stochastic demands, $MEN, 2E, nP, F.FC, LT, Tr.FC, Tr.M|SD, Inv, OC|C(Tr, OC, Inv)$. The network consists of production sites (known and located) and platforms (to be located). Products are transported from the production plants to the distribution centers using a transport mode and a route. Customers are delivered by distribution centers in the same way. An available transport mode list is defined for each road. The customers demand is modeled by a normal distribution function. The objective is to locate the sites where opened platforms to satisfy the demands while minimizing costs. To solve this nonlinear model, the authors proposed a linear approximation of the variance of the demand. Then, they use a separation method to solve the problem. The datasets are randomly generated according to four criteria: 21

- the size of the problem (24, 32 or 48 customers ; 8, 10 or 16 plants, warehouses and types of product), 22
- the network capacity (number of plants that may produce a product type, number of platforms that may handle a product type, number of available types of platform on each potential sites), 23
- the safety stocks according to change in demand and lead-times, 27
- the planning horizon of four periods (quarterly) or several periods (monthly). 28

There is one transport mode between production plants and warehouses. However, three transport modes are available between warehouses and customers. The authors note that the computational times may vary across the size of the datasets. Moreover, the capacity criterion related to the number of plants and the number of platforms is the one that has the largest impact on the solving problem difficulty. 33

In 2012, Tsao *et al.* [29] proposed a three-echelon model of location platforms with stochastic demands, $MEN, 3E, 1P, LT, Tr.FC, Tr.M, SA|SD, Inv, OC|C(Tr, F, Inv)$. The network consists in suppliers who are delivering national platforms (known and fixed). They distribute products to regional platforms (to locate) which then distribute them to the stores. A regional platform has a circular impact area (centered on the platform) and distributes products to every store under its influence. The national and regional platforms have no capacity constraint. The stores demand is modeled by a Poisson distribution function. 41

Lead-times between national and regional platforms are ignored. However, the lead-times between regional platforms and their stores are to be considered. Carriers discount is evaluated based upon transported quantities between national and regional platforms. The costs between regional platforms and stores are divided into fixed and variable costs. To solve this problem, the authors used a two-phase approximated heuristic proposed by [30]. The first step consists in dividing the territory according to the density of stores around each national platform. Each region is assigned to a national platform. In the second step, regional platforms are located and stocks are distributed.

In 2013, Ramezani *et al.* [20] present a stochastic multi-objective, multi-product and multi-period model, $MEN, 2E, nP, F.FC, Tr.FC | SD, OC | P(Tr, F, OC, AR), QoS, RFR$. The network is modeled such as a multi-echelon network. In this work, the authors consider the location of sites within a framework of reverse logistic. According to Pohlen and Farris, "reverse logistics represents the process by which organization recovers by-products and residuals for reuse, resale, remanufacturing, recycling or disposal". This model differs from the previous ones because, in addition to the demand, several various model parameters are stochastic. The assumptions are:

- the number of opened facilities on each level is limited,
- the facilities have a finite capacity,
- the stochastic data are: the product prices, the costs of the facilities, the provision and evaluation of raw materials, the costs of returns,
- opening and transport costs are known and fixed.

The approach proposed by the authors is a stochastic programming method. The model includes two types of variables: binary variables for network designs and continuous ones for quantities that will be transported on the network. The proposed model allows to locate facilities in each level and to define their ability of optimizing three criteria: maximization of the total profit, the customer service rate and the minimization of the rate of faulty raw materials. The stochastic parameters are modeled by a uniform distribution function. To solve the problem, the authors use the ε -constraint method.

In this section, three location models with stochastic demands have been shown. One of them includes the dimension of reverse logistics. In the first two cases, the furthest end customers (production sites or national platform) are known and fixed. The number and the location of the facilities of a single level must therefore be determined. The demand is modeled by a normal or Poisson distribution function. In the previous quoted work, many parameters are stochastic and modeled by a uniform distribution function.

5. CONCLUDING REMARKS

In Table 4, the methods quoted in this paper are described. Six authors use the integer linear programming (ILP), [1, 10, 15, 16, 24, 28]. The authors find an optimal

TABLE 4. Resolution methods.

	ILP	Heuristics	Lagrangian relaxation	Local search	Simulated annealing	MOHPSO	ϵ -con- straints
Saldanha-da-Gama <i>et al.</i> [22]		X					
Melo <i>et al.</i> [16]	X						
Ghaderi <i>et al.</i> [7]		X			X		
Hinojosa <i>et al.</i> [11]		X	X				
Canel <i>et al.</i> [2]		X					
Melachrinoudis <i>et al.</i> [15]	X						
Syam [26]			X		X		
Ambrosino <i>et al.</i> [1]	X						
Pirard <i>et al.</i> [19]		X					
Hinojosa <i>et al.</i> [12]		X					
Thanh <i>et al.</i> [27, 28]	X	X	X				
Suon [24]	X			X			
Pan <i>et al.</i> [18]		X	X				
Shankar <i>et al.</i> [23]						X	
Tsao <i>et al.</i> [29]		X					
Hameur-Lavoie <i>et al.</i> [10]	X						
Ramezani <i>et al.</i> [20]							X

solution with this method for a few datasets. For instance, Ambrosino *et al.* [1] find an optimal solution with ILP in a small dataset (30 customers, 2 available central depots and 5 available regional depots). The computational time is less than 16 minutes. If the number of customers or available facilities increases, the ILP does not find an optimal solution and computational time increase significantly. For 60 customers (2 available central depots and 5 available regional depots), the computational time is more than 10 hours and the gap is around 3.2%. For the higher dataset (135 customers, 5 available central depots and 23 available regional depots), the gap is around 42.96% and the computational time is more than 257 h. Melo *et al.* [16] solve optimally in less than 5 hours for a number of randomly generated datasets (50 to 150 customers, 5 to 20 available facilities). In the case of multi-objective models, the objective function is a weighted sum of each criteria. The heuristic methods are most commonly used [2, 7, 11, 12, 18, 19, 22, 28, 29]. Four papers propose methods based on Lagrangian relaxation [11, 18, 26, 28]. Four references use metaheuristics such as simulated annealing, [7, 26], local search [24] or multiobjective hybrid PSO [23]. To solve a multiobjective problem, Shankar *et al.* implement MOHPSO with a Pareto front determining dominating solutions. Ramzani *et al.* [20] use ϵ -constraints method for multiobjective problems.

Datasets used to test the methods have different sizes and are randomly generated by the authors. The size of datasets presented in the literature are gathered in Table 5. For each paper, the number of periods, product types and echelons are given. For each echelon, the number of available sites and customer are detailed. We see that the sizes may differ drastically. The number of customers varies between 1 and 500. There are between 1 and 20 product types. For papers including

TABLE 5. Size of datasets.

	Periods	Product types	Echelons number	Available sites for each echelon			Customers
				1	2	3	
Saldanha-da-Gama <i>et al.</i> [22]	15	1	1	5 to 50	5 to 50		10 to 500
Melo <i>et al.</i> [16]	3 to 6	3 to 6	1		10 to 20		50 to 150
	3 to 5	5 to 10	2	5	8 to 20		50 to 150
Ghaderi <i>et al.</i> [7]	5 to 20	1	1		46 to 162		20 to 40
Hinojosa <i>et al.</i> [12]	4	2 to 3	2	5 to 40	5 to 40		10 to 75
Canel <i>et al.</i> [2]	5	1	2	3	15		15
Syam [26]	5	5	2	10 to 100	2 to 20		12 to 120
Ambrosino <i>et al.</i> [1]		1	2	2 to 5	5 to 23		30 to 135
Pirard <i>et al.</i> [19]	5	20 + 45*	3	10	6	10	20
Hinojosa <i>et al.</i> [11]	2 to 8	2 to 12	2	5 to 40	5 to 40		10 to 125
Thanh <i>et al.</i> [27, 28]		10 to 18	3	15 to 27	10 to 22	5 to 13	100 to 270
Suon [24]	4	5 + 451*	2	7	7		79
Pan <i>et al.</i> [18]	3 to 10	1	3 to 10		2 to 20		1 to 5
Shankar <i>et al.</i> [23]		1	3	3	5	6	7
Hameur-Lavoie <i>et al.</i> [10]	4 to 12	8 to 16	2	8 to 16	8 to 16		24 to 48
Ramezani <i>et al.</i> [20]		2 + 5*	2	6	5		10

* $n + m$: n types of product and m components

both products and components, we note $x + y$ (where x is the number of product types and y is the number of components) in column “Product types”.

A notation and a classification for logistic network design that details the structure, management rules and performance criteria has been presented. This notation has been used in twenty papers and it details the multi-period models found in the literature. Most articles deal with deterministic, multi-level models and only few of them include the international aspect of logistics, lead-times or subcontracting. Heuristics are most commonly used to solve facility location problems but Griffis *et al.* [9] consider that the growing complexity of the models does not allow a more satisfactory resolution using exact or heuristic methods, concluding that metaheuristics provide more suitable methods to optimize the supply chain as a whole. Concerning environmental policies, single-period models with gas emission criteria are reported ([5, 33, 34]) but no multi-period models. However in an environmental context we find a multi-period model satisfying the objective to maximize the raw materials quality in a network that includes reverse logistics. This criterion may generate future works on multi-period models.

REFERENCES

- [1] D. Ambrosino and M.G. Scutellà, Distribution network design: New problems and related models. *Eur. J. Oper. Res.* **165** (2005) 610–624.
- [2] C. Canel, B.M. Khumawala, J. Law and A. Loh, An algorithm for the capacitated, multi-commodity multi-period facility location problem. *Comput. Oper. Res.* **28** (2001) 411–427.

- [3] J. Dias, M.E. Captivo and J. Climaco, Capacitated dynamic location problems with opening, closure and reopening of facilities. *IMA J. Manage. Math.* **17** (2006) 317–348. 1 2
- [4] W. Domschke and A. Drexl, ADD-heuristics’ starting procedures for capacitated plant location models. *Eur. J. Oper. Res.* **21** (1985) 47–53. 3 4
- [5] S. Elhedhli and R. Merrick, Green supply chain network design to reduce carbon emissions. *Transp. Res. D* **17** (2012) 370–379. 5 6
- [6] D. Erlenkotter, A dual-based procedure for uncapacitated facility location. *Oper. Res.* **26** (1978) 992–1009. 7 8
- [7] A. Ghaderi and M.S. Jabalameli, Modeling the budget-constrained dynamic uncapacitated facility location network design problem and solving it via two efficient heuristics: A case study of health care. *Math. Comput. Model.* **57** (2013) 382–400. 9 10 11
- [8] Graham, L. Ronald, Lawler, L. Eugene, Lenstra, J. Karel and Kan, AHG. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey. *Ann. Discrete Math.* **5** (1979) 287–326. 12 13 14
- [9] S.E. Griffis, J.E. Bell and D. Closs, Metaheuristics in Logistics and Supply Chain Management. *J. Business Logistics* **33** (2012) 90–106. 15 16
- [10] G. Hamer-Lavoie and J.F. Cordeau, Un modèle pour la conception d’un réseau de distribution avec localisation, affectation et stocks. *Inf. Syst. Oper. Res.* **44** (2006) 1–18. 17 18
- [11] Y. Hinojosa, J. Puerto and F.R. Fernandez, A multiperiod two-echelon multicommodity capacitated plant location problem. *Eur. J. Oper. Res.* **123** (2000) 271–291. 19 20
- [12] Y. Hinojosa, J. Kalcsics, S. Nickel, J. Puerto and S. Velten, Dynamic multi-echelon facility-location. *Comput. Oper. Res.* **35** (2008) 373–391. 21 22
- [13] A. Kuehn and M. Hamburger, A heuristic program for locating warehouses. *Manage. Sci.* **9** (1963) 643–666. 23 24
- [14] A. Martel, The design of production-distribution networks: A mathematical programming approach. *Supply Chain Optimization* **98** (2005) 265–305. 25 26
- [15] E. Melachrinoudis and H. Min, The dynamic relocation and phase-out of a hybrid, two echelon plant/warehousing facility. A multi objective approach. *Eur. J. Oper. Res.* **123** (2000) 1–15. 27 28 29
- [16] M.T. Melo, S. Nickel and F. Saldanha-Da-Gama, Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Comput. Oper. Res.* **33** (2006) 181–208. 30 31 32
- [17] M.T. Melo, S. Nickel and F. Saldanha-Da-Gama, Facility location and supply chain management: A review. *Eur. J. Oper. Res.* **196** (2009) 401–412. 33 34
- [18] F. Pan and R. Nagi, Multi-echelon supply chain network design in agile manufacturing. *Omega* **41** (2013) 969–983. 35 36
- [19] F. Pirard, D. Duvivier and O. Roux, Une heuristique hybride pour la reconfiguration des réseaux logistiques dans le cadre d’entreprises multi-sites. Actes du 6 ème congrès international de génie industriel, Besançon France, 2005. 37 38 39
- [20] M. Ramezani, M. Bashiri and R. Tavakkoli-Moghaddam, A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. *Appl. Math. Model.* **37** (2013) 328–344. 40 41 42
- [21] G. Sá, Branch-and-bound and approximate solutions to the capacitated plant-location problem. *Oper. Res.* **17** (1969) 1005–1016. 43 44
- [22] F. Saldanha-Da-Gama and M.E. Captivo, A heuristic approach for the discrete dynamic location problem. *Location Sci.* **6** (1998) 211–223. 45 46
- [23] B.L. Shankar, S. Basavarajappa, J.C.H. Chen and R.S. Kadadevaramath, Location and allocation decisions for multi-echelon supply chain network - A multi-objective evolutionary approach. *Expert Syst. Appl.* **40** (2013) 551–562. 47 48 49
- [24] M. Suon, Optimisation de la logistique internationale à horizon stratégique. Application à un constructeur automobile. Thèse de doctorat de l’université de Clermont-Ferrand, 10 février 2011. 50 51 52
- [25] D. Sweeney and R. Tatham, An improved long-run model for multiple warehouse location. *Manage. Sci.* **22** (1978) 748–758. 53 54

- 1 [26] S.S. Syam, A model and methodologies for the location problem with logistical components.
2 *Comput. Oper. Res.* **29** (2002) 1173–1193.
- 3 [27] P.N. Thanh, N. Bostel and O. Péton, A dynamic model for facility location in the design of
4 complex supply chains. *Int. J. Prod. Econ.* **113** (2008) 678–693.
- 5 [28] P.N. Thanh, N. Bostel and O. Péton, A DC programming heuristic applied to the logistics
6 network design problem. *Int. J. Prod. Econ.* **136** (2012) 94–105.
- 7 [29] Y.C. Tsao and J.C. Lu, A supply chain network design considering transportation cost
8 discounts. *Transp. Res. E* **48** (2012) 401–414.
- 9 [30] Y.C. Tsao, D. Mangotra, J.C. Lu and M. Dong, A continuous approximation approach for
10 the integrated facility-inventory allocation problem. *Eur. J. Oper. Res.* **222** (2012) 216–228.
- 11 [31] T. Van Roy and D. Erlenkotter, A dual-based procedure for dynamic facility location. *Man-*
12 *age. Sci.* **28** (1982) 1091–1105.
- 13 [32] D. Vila, A. Martel and R. Beauregard, Designing logistics networks in divergent process
14 industries: A methodology and its application to the lumber industry. *Int. J. Prod. Econ.*
15 **102** (2006) 358–378.
- 16 [33] F. Wang, Lai X and N. Shi, A multi-objective optimization for green supply chain network
17 design. *Decision Support Systems* **51** (2011) 262–269.
- 18 [34] T. Xifeng, Z. Ji and X. Peng, A multi-objective optimization model for sustainable logistics
19 facility location. *Transp. Res. D* **22** (2013) 45–48.

